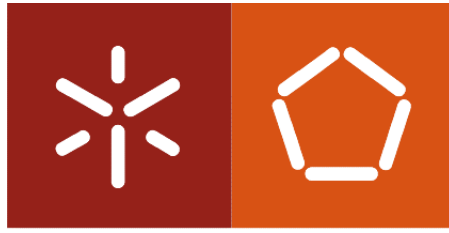


Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Tiago Filipe Moreira Nunes

**Desenvolvimento de uma impressora
3D (FDM) com extrusor ajustável**

Novembro 2015



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Tiago Filipe Moreira Nunes

**Desenvolvimento de uma impressora
3D (FDM) com extrusor ajustável**

Dissertação de Mestrado
Mestrado Integrado em Engenharia Eletrónica
Industrial e Computadores

Trabalho efetuado sob a orientação do
**Professor António Fernando Macedo
Ribeiro**

Novembro 2015

DECLARAÇÃO

Nome: Tiago Filipe Moreira Nunes

Endereço eletrónico: a62023@alunos.uminho.pt

Telefone: 914333887

Número do Cartão de Cidadão: 14138235

Título da dissertação:

Desenvolvimento de uma impressora 3D (FDM) com extrusor ajustável

Orientador: Professor Doutor António Fernando Macedo Ribeiro

Ano de conclusão: 2015

Dissertação submetida na Universidade do Minho para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Eletrónica Industrial e Computadores

É AUTORIZADA A REPRODUÇÃO INTEGRAL DESTA TESE/TRABALHO APENAS PARA EFEITOS DE INVESTIGAÇÃO, MEDIANTE DECLARAÇÃO ESCRITA DO INTERESSADO, QUE A TAL SE COMPROMETE.

Universidade do Minho, __/__/____

Assinatura: _____

Agradecimentos

Este espaço é destinado a todos aqueles que contribuíram, de alguma forma, para a realização da minha tese de mestrado em Engenharia Eletrónica Industrial e Computadores. Por essa razão não posso deixar de manifestar os meus sinceros agradecimentos.

Ao meu orientador, Professor António Fernando Macedo Ribeiro, pela orientação, incentivo, apoio e total disponibilidade. Agradeço uma vez mais por todas opiniões e críticas que me permitiram a ultrapassar os obstáculos que foram surgindo ao longo deste trabalho.

Aos meus colegas, em especial ao Francisco Mendes e André Magro que mostraram-se sempre disponíveis, proporcionando ensinamentos e sugestões muito importantes para a realização deste projeto.

Aos meus colegas de mestrado que para além do apoio e dos momentos de boa disposição que me proporcionaram, ajudaram-me na realização do presente trabalho.

À Catarina Carvalho, um especial agradecimento por toda a compreensão demonstrada no decorrer deste trabalho, por me apoiar nas minhas decisões revelando-se ser o meu verdadeiro suporte.

À minha família, pela educação que me proporcionam, por todo o incentivo que me deram perante os desafios que surgiram ao longo do meu percurso académico. A eles dedico um especial agradecimento pois me ensinaram a fazer mais e melhor.

Resumo

O presente trabalho trata o estudo de um processo de impressão tridimensional (*Fused Deposition Modeling*) e desenvolvimento de uma nova tecnologia, metodologia e ferramenta de extrusão capaz de diminuir o tempo total de impressão de um modelo. Esta técnica de impressão tridimensional pertence ao grupo dos métodos de prototipagem rápida e consiste em obter um objeto a partir de um modelo digital de três dimensões.

Este método de impressão requer um filamento termoplástico, por exemplo, *polylactic acid* (PLA), ou *acrylate-butadiene-styrene* (ABS) que é aquecido até ao ponto de fusão e extrudido por um orifício “*nozzle*” com o formato e tamanho pretendido. Ao ser movimentado por um sistema de três graus de liberdade permite desenhar formas complexas depositando uma quantidade específica de um material termoplástico nos sítios adequados. Uma vez concluída uma camada horizontal, a plataforma de impressão sobe ligeiramente para dar origem a uma nova camada (normalmente distâncias que rondam os 0.05mm aos 0.3mm). Este processo repete-se sucessivamente até o modelo estar concluído.

Este processo de impressão pode levar poucos minutos até algumas horas no caso de peças mais complexas. O que determina o tempo de impressão é a complexidade do modelo impresso e as características da impressora. No entanto, a velocidade de impressão não é limitada só pelos modelos impressos mas também pelas propriedades químicas dos termoplásticos que são utilizados.

Foi assim feita uma pesquisa e desenvolvido um sistema de extrusão bem como o programa de corte, que permite a economia em pelo menos 50% do tempo de impressão e o aumento da resistência mecânica das peças impressas sem ultrapassar os limites funcionais da impressora 3D.

Os principais resultados obtidos foram a redução de tempo de impressão, devido à capacidade e flexibilidade da nova tecnologia. Para além do objetivo principal, esta tecnologia permitiu obter modelos impressos com maior resistência mecânica.

Palavras-chave: Impressora 3D, Prototipagem rápida, extrusor.

Abstract

This paper deals with the study of a three-dimensional printing process (Fused Deposition Modeling) and development of a new technology, methodology and extrusion tool that can reduce the total time printing a model. This three-dimensional printing technique belongs to the group of rapid prototyping methods and is to obtain an object from a digital model of three dimensions.

This printing method requires a thermoplastic filament, for example, polylactic acid (PLA), or acrylate-butadiene-styrene (ABS) which is heated to melting point and extruded through an orifice "nozzle" in the shape and desired size. When being moved by a system of three degrees of freedom allows designing complex shapes by depositing a specific amount of a thermoplastic material at the appropriate sites. Once completed a horizontal layer, the print platform rises slightly to give a new layer (usually distances that are around 0.05mm to 0.3mm). This process is repeated successively until the model is complete.

This printing process may take a few minutes to a few hours for more complex parts. What determines the printing time is the complexity of the printed pattern and printer characteristics. However, the print speed is not limited only by the printed models but also by the chemical properties of the thermoplastics that are used.

It was thus made research and developed an extrusion system and a cutting program that allows savings of at least 50% of the printing time and increase the mechanical resistance of the printed parts without exceeding the functional limits of the 3D printer.

The main results were the printing time reduction, due to the capacity and flexibility of the new technology. Apart from the main goal, this technology allowed to obtain printed models with higher mechanical strength.

Key words: 3D Printing, Rapid Prototyping, extruder.

Conteúdo

1- Introdução.....	1
1.1 - Enquadramento e Objetivos.....	1
1.2 - Estrutura da dissertação	3
2 - Estado da Arte.....	4
2.1 - Prototipagem rápida.....	4
2.2 - Máquina de Prototipagem Rápida.....	5
2.2.1 – Tipos	6
2.2.2 - Estereolitografia (SLA).....	6
2.2.3 - Manufatura de Objetos em Lâminas (LOM)	7
2.2.4 - Sinterização Seletiva a Laser (SLS)	8
2.2.5 - Modelação por Deposição de Material Fundido (FDM)	9
2.2.6 - Impressão 3D por Jato de Tinta (MJT)	10
2.3 - Modelos Tridimensionais.....	11
2.4 - Modelos tridimensionais no formato STL.....	12
2.5- Programas de corte de modelos digitais	12
2.6- Materiais Termoplásticos	14
2.7 - Sistemas de Extrusão	15
2.7.1 – Extrusor convencional	15
2.7.2 – Extrusor de impressão a cores	16
3 – Estrutura da impressora 3D	17
3.1 – Cinemática	17
3.1.1 – Particularidades do Sistema	18
3.1.2 – Importância da Estrutura da Impressora	19
3.2 – Componentes de Movimento Linear	19
3.2.1 – Guias Lineares	20
3.2.2 – Correias e Polias	21
3.2.3 – Motores de Passo	22
3.3 – Plataforma de Impressão	23
3.3.1 – Mesa aquecida	24
3.3.2 – Tratamento da superfície de impressão	25
3.4 - Eletrónica de Controlo	27

3.4.1 – Microcontrolador	28
3.4.1 – Firmware	29
3.4.2 – Cartão SD	30
3.4.3 – Sensores de fim de curso	31
3.4.4 – Controlador de Motor de Passo	32
4 - Sistema de extrusão ajustável	34
4.1 – Extrusão de um material em estado de fusão	35
4.1.1 – Acabamento superficial.....	36
4.1.2 – Resistência mecânica do modelo	37
4.2 – Tempo de impressão.....	38
4.2.1 – Limitação da estrutura mecânica	38
4.2.2 – Limitação da resolução das camadas e a complexidade.....	39
4.2.3 – Limitação do Calculo das trajetórias	40
4.3 – Idealização do extrusor ajustável	40
4.3.1 – Deposição de um perfil retangular.....	42
4.3.2 – Idealização geral da metodologia proposta	43
4.4 – Protótipo do extrusor ajustável	46
4.4.1 – Bico de extrusão	46
4.4.2 – Sistema de Tração	47
4.4.3 – Sistema de Aquecimento	49
4.4.4 – Sistema de Rotação	51
4.4.5 – Sistema de Arrefecimento.....	52
4.4.6 – Eletrónica de controlo do sistema de extrusão	54
4.4.7 – Integração do extrusor na impressora 3D.....	55
5 – Desenvolvimento do Programa de Corte	56
5.1 – Ferramentas e Técnicas	56
5.1.1 – Início da impressão e técnicas de aderência.....	57
5.1.2 – Técnicas de Preenchimento	61
5.2 – Desenvolvimento do programa de corte para o extrusor ajustável.....	62
5.2.1 – Corte do modelo.....	64
5.2.2 – <i>Offset</i> do modelo.....	66
5.2.3 – Orientação do filamento	70
5.2.4 – Preenchimento do interior do modelo	72

5.2.5 – Código G-Code.....	74
5.2.6 – Ambiente gráfico do programa de corte.....	79
6 – Resultados	82
6.1 – Introdução.....	82
6.2 – Materiais utilizados	82
6.2 – Análise das características do equipamento desenvolvido	83
6.2.1 – Extrusor ajustável	83
6.3 – Análise das funcionalidades do Programa de corte	86
6.3.1 – Programa de corte.....	86
6.4 – Ensaio e Procedimentos	89
6.4.1 – Tempo de impressão	90
6.4.2 – Qualidade de impressão.....	92
6.4.3 – Resistência mecânica	95
7 – Conclusões.....	98
7.1 – Conclusões gerais.....	98
7.2 – Trabalhos futuros	100
8 - Referências.....	102

Índice de Figuras

Figura 2.1 - Princípio de funcionamento do método de impressão de cura de resinas também chamado de Estereolitografia.....	7
Figura 2.2 - Princípio de funcionamento do sistema de impressão de Manufatura de Objetos em Lâminas.	8
Figura 2.3 - Princípio de funcionamento do sistema de Sinterização Seletiva a Laser.	9
Figura 2.4 - Princípio de funcionamento do sistema de Modelagem por Deposição de Material Fundido.	10
Figura 2.5 - Princípio de funcionamento do sistema de Impressão 3D por jato de tinta.	11
Figura 2.6 - Programa de modelação 3D SolidWorks e respetivo modelo 3D.	11
Figura 2.7 - Programa de modelação 3D SolidWorks e respetivo modelo 3D no formato STL.....	12
Figura 2.8 - Programas de corte de um modelo digital 3D. a) Programa Simplify3D desenvolvido pela Simplify3D. b) Programa Cura desenvolvido pela Ultimaker.....	13
Figura 2.9 - Mecanismo de extrusão que engloba um sistema de tração e de alimentação.	16
Figura 2.10 - Sistema de extrusão multicolor.....	16
Figura 3.1 - Sistema cartesiano da Impressora 3D BEETHEFIRST.....	18
Figura 3.2 - Sistema de movimento linear utilizado na BEETHEFIRST.....	21
Figura 3.3 - Sistema de transferência de movimento linear da BEETHEFIRST.	22
Figura 3.4 - Motores Nema17 aplicados os eixos da BEETHEFIRST.	23
Figura 3.5 - Modelo impresso em uma plataforma de acrílico, usada em impressões na BEETHEFIRST.....	24
Figura 3.6 - Mesa aquecida aplicada a uma plataforma de impressão.....	25
Figura 3.7- Aplicação de fita de pintura em uma plataforma de impressão.....	25
Figura 3.8 - Aplicação de uma adesiva desenvolvida pela 3DSytems em uma plataforma de impressão.	26
Figura 3.9 - Aplicação de fira adesiva Kapton em uma plataforma de impressão.....	27
Figura 3.10 - Placa de controlo R2C2 utilizada na impressora BEETHEFIRST.....	28
Figura 3.11 - Microcontrolador utilizado na placa de controlo R2C2.	29
Figura 3.12 - Slot para cartões de memória utilizado na placa de controlo R2C2.	30

Figura 3.13 - Sensores de fim de curso utilizado em uma impressora 3D. a) Sensor Mecânico. b) Sensor Ótico.....	32
Figura 3.14 - Controladores de motor de passo para cada eixo da impressora.	33
Figura 4.1 - Efeito escada no modelo impresso. a) Efeito escada modelo de baixa resolução. b) Efeito escada modelo de alta resolução.....	36
Figura 4.2 - Aspeto superficial das paredes dos modelos impressos.....	37
Figura 4.3 - Primeira camada do modelo e respetivos contornos e travessias.	39
Figura 4.4 - Filamentos estruídos por um sistema de extrusão ajustável (esquerda) e pelo extrusor tradicional (direita). a) Filamento retangular. b) Filamento circular.....	41
Figura 4.5 - Superfície de contacto entre os filamentos. a) Superfície de contacto no extrusor tradicional. b) Superfície de contacto do extrusor ajustável.....	42
Figura 4.6 - Idealização do sistema de tração.	43
Figura 4.7 - Idealização do sistema de aquecimento.	44
Figura 4.8 - Idealização do Sistema de arrefecimento	45
Figura 4.9 - Sistema de orientação do bico.	45
Figura 4.10 - Protótipo final do extrusor ajustável.....	46
Figura 4.11 - Bico de extrusão utilizado no extrusor ajustável.	47
Figura 4.12 - Sistema de tração e de aperto do extrusor ajustável.	48
Figura 4.13 - Sistema de aquecimento do extrusor ajustável.....	50
Figura 4.14 - Sistema de rotação do extrusor ajustável.....	51
Figura 4.15 - Sistema de arrefecimento do extrusor ajustável.	52
Figura 4.16 - Sistema de arrefecimento do filamento extrudido.....	53
Figura 4.17- Placa de controlo R2C2 e respetivas alterações.	55
Figura 4.18 - Integração do extrusor ajustável na impressora 3D.	55
Figura 5.1 - Técnica Brim aplicada a um modelo 3D.....	58
Figura 5.2 - Técnica de Skirt aplicada a um modelo 3D.	58
Figura 5.3 - Técnica de Raft aplicada a um modelo 3D.	59
Figura 5.4 – Estrutura de suporte do modelo. a) Modelo sem suporte. b) Modelo com suporte.....	60
Figura 5.5 - Influência da orientação do modelo. a) Modelo com necessidade de suporte. b) Modelo sem necessidade de suporte.	60
Figura 5.6 - Padrões mais utilizados no preenchimento interno dos modelos.....	61
Figura 5.7- Etapas de conversão de um modelo 3D em instruções interpretáveis pela impressora 3D.....	63

Figura 5.8- Representação de um triângulo no ficheiro STL.	64
Figura 5.9 – Resultados obtidos pela interseção entre um triângulo e um plano.	65
Figura 5.10 - Diferença entre modelo compensado e não compensado.	66
Figura 5.11 - Forma de determinar o sentido de rotação do contorno.	67
Figura 5.12 - Linha paralela obtida pelo Offset de um segmento.	68
Figura 5.13- Interseção entre duas retas calculadas a partir do Offset dos segmentos	69
Figura 5.14- Número de vértices que compõem o contorno do modelo.	71
Figura 5.15 – Demonstração do cálculo do ângulo de orientação.	72
Figura 5.16 - Interseção entre o contorno do modelo e o padrão de preenchimento..	73
Figura 5.17 - Leitura dos pontos de Offset de um contorno e respetiva conversão em instruções.	75
Figura 5.18 - Introdução da componente de rotação em instruções G-Code.	76
Figura 5.19 - Instruções geradas pela leitura dos pontos de preenchimento.	76
Figura 5.20 - Relação entre o material extrudido e o filamento tracionado.	78
Figura 5.21- Introdução do comprimento do filamento nas instruções de controlo. ...	79
Figura 5.22 - Interface gráfico desenvolvido para o programa de corte.	80
Figura 5.23 - Consola de controlo da impressora 3D.	81
Figura 6.1- Filamentos utilizados para a realização de testes. a) Filamento de cor verde. b) Filamento de cor azul.....	83
Figura 6.2 - Padrão cravado no filamento pelo sistema de tração.	84
Figura 6.3 - Qualidade dos filamentos extrudido. a) 5mm/s . b) 10 mm/s. c) 15 mm/s. d) 20mm/s.....	85
Figura 6. 4 - Provete escolhido para a realização de testes do programa de corte.....	86
Figura 6.5 - Preenchimento gerado pelo programa de corte. a) 5 % b) 10% c) 15% d) 20 %	88
Figura 6.6- Código gerado para a impressão da primeira camada do modelo.	88
Figura 6.7 - Modelo de teste. a) Modelo 3D b) Modelo impresso.	89
Figura 6. 8 -Modelo de teste escolhido para o primeiro teste experimental.	90
Figura 6.9 - Segundo modelo de teste.....	91
Figura 6. 10 – Primeiro modelo de análise da qualidade superficial	92
Figura 6.11 – Segundo modelo de análise da qualidade superficial	94
Figura 6.12 - Teste da resistência mecânica à deflexão	96

Índice de Tabelas

Tabela 4.1 - Materiais utilizados para a construção do sistema de tração e aperto.	49
Tabela 4.2 - Materiais utilizados para a construção do sistema de aquecimento.....	50
Tabela 4.3 - Materiais utilizados para a construção do sistema rotativo.	52
Tabela 4.4- Materiais utilizados para a construção do sistema de arrefecimento do extrusor.....	53
Tabela 4.5 -Materiais utilizados para a construção do sistema de arrefecimento do filamento.	54
Tabela 6. 1 - Dimensões do filamento obtido para uma gama de velocidades de extrusão.....	85
Tabela 6.2 - Tempo de corte do modelo para diferentes resoluções.	87
Tabela 6.3 - Tempos de impressão obtidos no primeiro teste.	91
Tabela 6.4 - Tempos de impressão obtidos no segundo teste.....	92

Capítulo 1

1- Introdução

Neste capítulo é apresentado o âmbito em que se insere esta dissertação, direcionada à melhoria de um método de prototipagem rápida. Descreve-se também os principais objetivos para a sua realização, bem como a estruturação de cada capítulo.

1.1 - Enquadramento e Objetivos

A globalização da economia induziu nos sectores industriais uma necessidade de resposta rápida às solicitações do mercado. Este tipo de resposta traduz-se na diminuição do tempo de colocação de novos produtos no mercado.

Com o avanço da ciência e da tecnologia muitas organizações e empresas estão a investir em inovação com o objetivo de desenvolver novos produtos, de maneira a acompanhar a era atual, devido à forte concorrência do mercado. A globalização tem aumentado cada vez mais a pressão competitiva e inovadora, não somente pela conceção de novos produtos, mas também para que as empresas possam entrar e sobreviver no mercado atual.

Um dos fatores conhecidos para o desenvolvimento de produtos é o grau de incerteza que no início do processo é bastante elevado, diminuindo com o tempo, mas é no início em que é selecionado a maior quantidade de soluções construtivas. As decisões entre alternativas no início do ciclo de desenvolvimento são responsáveis por 85% do custo do produto final. O custo de modificação aumenta ao longo do ciclo de desenvolvimento, pois cada mudança, pode invalidar decisões anteriormente tomadas [ROZENFELD et al [2006]].

Novas tecnologias têm surgido nas últimas décadas a fim de acolher um método de conceção de produtos no menor tempo possível.

Uma tecnologia que tem contribuído para este cenário é a prototipagem rápida (também conhecida como Impressão 3D) utilizando a impressão tridimensional. A impressão 3D é o apelido que foi dado ao processo de criação de um objeto em três

dimensões a partir de um modelo digital. Este tipo de impressão é realizada por um processo aditivo, na qual camadas de um material são adicionadas sucessivamente umas em cima de outras de modo a compor objetos de formatos variados.

Esta técnica é considerada distinta de outras formas convencionais de criação, como por exemplo a fresagem, pois essas funcionam removendo o material em excesso da superfície de uma peça, a fim de dar forma e acabamento desejados, enquanto na impressão 3D é adicionado material, havendo pouco ou nenhum desperdício. Apesar dos métodos convencionais serem simples quando comparados aos métodos atuais de impressão 3D, torna-se inviável quando se pretende criar formas geométricas de elevada complexidade, ou quando o tempo de concepção precisa de ser reduzido. Além da capacidade de criar peças num curto espaço de tempo, a impressão 3D possibilita fabricar peças precisas, precisão que está diretamente relacionada com a espessura de cada camada [HEINZL; HERTZ et al 1985].

Este processo de impressão 3D engloba a fabricação de um modelo digital tridimensional com a ajuda de um programa de edição a três dimensões. O modelo é dividido em camadas através de um algoritmo de corte criando assim informações detalhadas sobre cada corte transversal. O processo de impressão é iniciado pela deposição de um filamento de um material termoplástico que é aquecido dentro de um extrusor até atingir a sua temperatura de transição vítrea (temperatura de transição entre o estado sólido e o líquido). Uma vez atingida a temperatura adequada o material é depositado com uma determinada forma numa base de impressão. De maneira a desenhar formas geométrica, o bico extrusor segue o caminho determinado por um algoritmo de corte, que fatia o modelo tridimensional original em várias camadas transversais, numa espessura que pode variar de 0.05 mm a 0.3mm.

Este processo de impressão tridimensional pode levar poucos minutos até algumas horas. O que vai determinar o tempo de impressão é a complexidade do modelo e as características da própria impressora.

Desse modo, esta dissertação focar-se-á na área da impressão 3D, onde se pretende desenvolver um sistema de impressão (FDM) mais eficiente, mais eficaz e acima de tudo mais rápido.

1.2 - Estrutura da dissertação

A presente dissertação está organizada em sete capítulos. Sendo o primeiro capítulo constituído pela presente introdução. O capítulo seguinte, dedicado ao estado da arte (Capítulo 2) é realizada uma revisão da literatura sobre os vários métodos de impressão 3D existentes atualmente. Outro tema em pesquisa diz respeito aos diferentes tipos de materiais termoplásticos aplicados na tecnologia de Deposição de Material Fundido (FDM). Salienta-se também a pesquisa feita em sistemas de extrusão de materiais termoplásticos para o mesmo tipo de tecnologia.

No terceiro capítulo é apresentado os constituintes mais importantes de uma impressora 3D. É feita a descrição detalhada da estrutura da impressora e de todos componentes elétricos. Ao longo do terceiro capítulo é feito o estudo da impressora utilizada neste projeto.

No quarto capítulo é apresentado com detalhe o desenvolvimento da metodologia e protótipo de um sistema de extrusão ajustável para um método de impressão 3D. Neste capítulo são descritas as etapas do desenvolvimento do protótipo, bem como, os aspetos diferenciadores relativamente aos sistemas existentes. Na descrição do equipamento dar-se-á ênfase ao sistema de deposição, sistema de rotação do bico extrusor e ao *hardware* de controlo.

No quinto capítulo é apresentado o desenvolvimento de uma ferramenta que permite converter um modelo digital 3D num conjunto de instruções destinadas a uma máquina de impressão tridimensional. Neste capítulo são expostos os métodos e as etapas de processamento, que transformam um modelo digital num conjunto de instruções (G-Code) que são lidas e processadas pela máquina de impressão 3D.

No sexto capítulo são expostos os resultados obtidos da implementação do sistema de extrusão variável, bem como, uma análise detalhada de cada modelo impresso. Para além disso, é feita também uma comparação com os mesmos modelos impressos por uma impressora 3D com um sistema de extrusão tradicional.

Finalmente, no sétimo capítulo são apresentadas as principais conclusões, dificuldades sentidas durante a realização desta dissertação. São também sugeridos trabalhos futuros relacionados no contexto da presente dissertação.

Capítulo 2

2 - Estado da Arte

2.1 - Prototipagem rápida

O termo prototipagem rápida designa um conjunto de tecnologias usadas com o intuito de fabricar objetos físicos a partir de um modelo digital gerado por um programa de desenho assistido por computador (DAC) ou por um *software* de modelação. Tais métodos são bastante peculiares, uma vez que eles agregam camadas sucessivas de um material, de forma a construir o modelo desejado. Tais sistemas também são conhecidos pelos nomes de produção aditiva, impressão tridimensional, produção de forma livre (*SFF – Solid FreeForm*) e produção em camadas (*Layered Manufacturing*) [Neri Volpato et al 2007].

Estas tecnologias oferecem um conjunto de vantagens em muitas aplicações quando comparados aos processos convencionais de remoção de material, tais como a fresagem ou torneamento. Estes métodos permitem obter objetos impressos que podem possuir um grau de complexidade elevado sem a necessidade de se fazer elaborados ajustes de máquinas. Para além disso, os sistemas de prototipagem permitem na maioria das vezes, que os objetos desejados sejam produzidos mais depressa e de forma mais barata. De fato, estima-se que as economias de tempo e de custos proporcionadas pela aplicação das técnicas de prototipagem rápida na construção de modelos seja na ordem de 70% a 90% relativamente a métodos convencionais [K.G.SWIFT, P.D.BOOKER et al 2011].

Atualmente existem pelo menos sete técnicas diferentes de prototipagem rápida disponíveis comercialmente, entre elas esta o método de modelação por deposição de Material Fundido (FDM, *Fused Deposition Modeling*), no qual, constrói um modelo adicionando sucessivas camadas de um termoplástico no estado de fusão. O filamento de um material termoplástico é desenrolado de uma bobina e levado até um sistema de extrusão que controla a fusão e deposição do fluxo do material. Este é o único método de impressão que usa diferentes tipos de termoplásticos para criar modelos com

diferentes geometrias, propriedades químicas e de grande resistência mecânica [C. K. CHUA , K. F. LEONG et al 2010]. Empresas como a *Stratasys*, *BeeVeryCeative* e *Ultimaker*, baseando-se neste método de impressão, com algumas alterações, criaram os seus próprios processos de prototipagem rápida.

2.2 - Máquina de Prototipagem Rápida

Pode-se entender que uma máquina de prototipagem rápida seja o resultado de um conjunto de métodos usados com o intuito de obter modelos físicos tridimensionais a partir de modelos digitais, onde os objetos desejados são obtidos através da adição e união de diversos materiais.

A máquina de prototipagem rápida oferece um conjunto alargado de vantagens tais como: redução de custo e do tempo de concepção, a precisão do produto final e a possibilidade de criar formas complexas. Para além das vantagens técnicas, este tipo de máquina ao contrário das de produções em massa, permitem ao seu utilizador desenvolver produtos próprios e personalizados de acordo com a sua necessidade [HOD LIPSON, MELBA KURMAN et al 2013].

Também conhecido como “ Fabricação Solida de Forma Livre”, “Manufatura Automatizada por Computador” ou “Manufatura em Camadas”, o método, em sua grande maioria, é descrito através dos seguintes passos:

- **Etapa 1:** Cria-se um modelo tridimensional virtual equivalente ao objeto a ser fabricado recorrendo a um *software* de modelação ou CAD;
- **Etapa 2:** O modelo criado é convertido para o formato STL;
- **Etapa 3:** Um *software* específico corta o modelo em camadas transversais muito finas, dispostas umas sobre as outras, com espessuras que variam entre os 0.05 mm – 0.3mm;
- **Etapa 4:** Através de um processo aditivo combina-se camadas de um material tal como, papel, termoplástico, cerâmica ou mesmo metal, correspondentes às fatias previamente obtidas no *software* de corte;
- **Etapa 5:** Uma vez concluído é feita a limpeza e o tratamento do modelo caso necessário.

2.2.1 – Tipos

Conforme [VOLPATO et al 2007], atualmente existem diversos métodos de prototipagem rápida disponíveis comercialmente, entre os quais os de maior utilização são:

- Estereolitografia (SLA, *Stereolithography*);
- Manufatura de Objetos em Lâminas (LOM, *Laminated Object Manufacturing*);
- Sinterização Seletiva a Laser (SLS, *Selective Laser Sintering*);
- Modelação por Deposição de Material Fundido (FDM, *Fused Deposition Modeling*);
- Impressão 3D por Jato de Tinta (MJT, *Multi Jet Modeling*; BPM, *Ballistic Particle Manufacturing*).

2.2.2 - Estereolitografia (SLA)

É considerado pioneiro entre os métodos de prototipagem rápida. Foi um padrão de avaliação entre os métodos de prototipagem rápida que surgiram após o seu desenvolvimento.

A construção dos protótipos é feita através de um processo de cura de uma resina epóxi líquida que, uma vez exposta à radiação ultravioleta, catalisa e solidifica. Neste método, uma plataforma móvel é montada dentro de um reservatório que contém uma resina epóxi ou acrílica a uma distância aproximadamente 150 μm abaixo da superfície da resina [PAULO JORGE BÁRTOLO et al 2011].

Um feixe laser de ultravioletas de alta precisão solidifica o desenho bidimensional referente à primeira fatia, deixando as restantes partes líquidas. A plataforma mergulha ligeiramente expondo uma nova camada de resina que é solidificada á primeira camada (Figura 2.1). O processo repete sucessivamente até que todas as fatias do modelo sejam criadas. Como o meio envolvente está no estado líquido, todas as zonas da peça que estão suspensas necessitam de suportes sólidos de resina.

Uma vez concluído o processo de impressão, o modelo é removido e é sujeito a uma pós-cura que lhe vai conferir a máxima resistência. Por fim, o modelo pode ser sujeito a operações de lavagem e/ou polimento, ou mesmo pintura, melhorando o seu aspeto e funcionalidade.

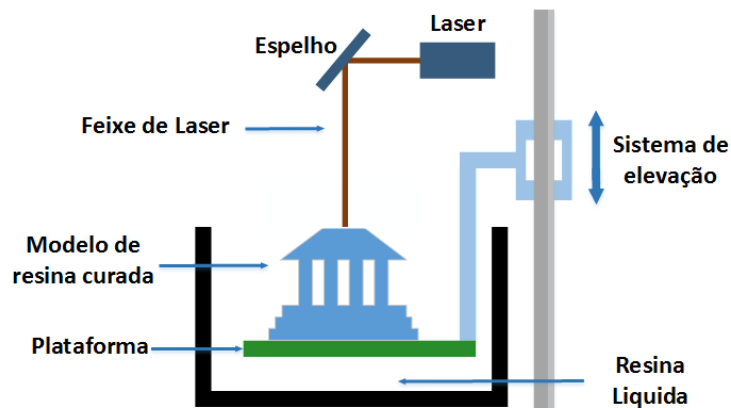


Figura 2.1 - Princípio de funcionamento do método de impressão de cura de resinas também chamado de Estereolitografia.

2.2.3 - Manufatura de Objetos em Lâminas (LOM)

É um método de prototipagem rápida desenvolvido pela *Helisys Inc.* Este método permite fabricar protótipos colando sucessivas folhas de papel adesivo umas sobre as outras. A produção do protótipo é feita através de dois rolos de papel laminado, um responsável por fornecer material e outro responsável por recolher o excedente. Na mesa do equipamento encontra-se uma base feita de papel e fita com espuma em ambas as faces. Durante o processo de construção do modelo, o rolo aplica tiras desse papel sobre a base, em seguida, um segundo rolo aquecido pressiona o papel contra a base com o objetivo de garantir a fixação deste. O passo seguinte, passa pela utilização de um laser de alta precisão que corta o contorno da primeira camada e enfraquece o papel excedente cortando-o em pequenos quadrados ou retângulos para facilitar a posterior remoção (Figura 2.2). O material retalhado permite formar um suporte para as partes mais delicadas do protótipo. Uma vez concluída a primeira parte do protótipo, a plataforma desce e uma nova camada é aplicada dando início a um novo ciclo do processo. Este ciclo é repetido sucessivamente até que o protótipo tenha sido construído [R.J.M. HAGUE; P.E.REEVES et al 2000].

O papel utilizado possui espessuras compreendidas entre os 0.1mm, 0.15mm e 0.20mm. A definição dos modelos impressos vai depender da qualidade e espessura do papel utilizado. Além de papel, este equipamento permite construir modelos em fibra de vidro, cerâmica e metal.

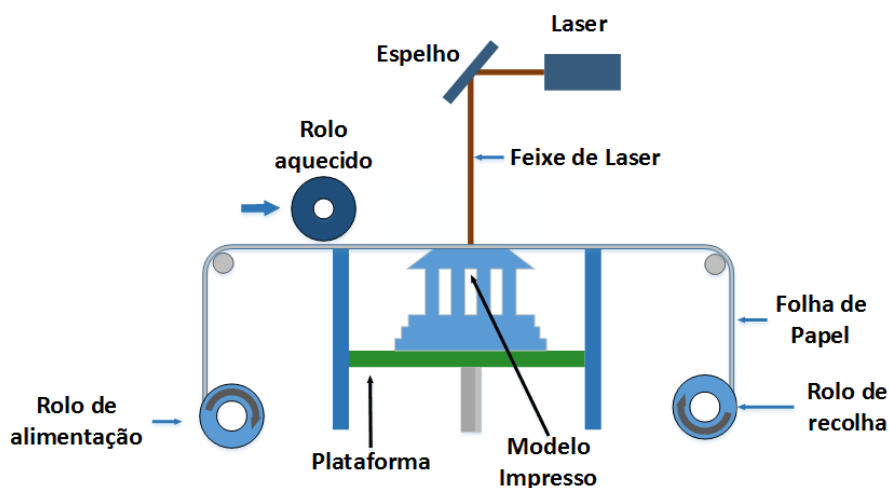


Figura 2.2 - Princípio de funcionamento do sistema de impressão de Manufatura de Objetos em Lâminas.

2.2.4 - Sinterização Seletiva a Laser (SLS)

É o terceiro método de prototipagem rápida mais utilizado, logo a seguir à Estereolitografia e a Modelação por Deposição de Material Fundido. Através desta técnica, que foi patenteada em 1989, é possível obter um modelo sólido através de materiais pulverulentos de serem fundidos por calor, tais como, o náilon, elastómeros e metais. Para construção do modelo pretendido, um laser sinteriza um perfil bidimensional no material em pó situado na plataforma de impressão. Uma vez concluído a primeira etapa, a plataforma desce, é aplicada uma nova camada de pó e novamente o laser sinteriza um novo perfil (Figura 2.3). Este processo repete-se até à última camada estar concluída [VOLKER SCHIMDT, MARIA REGINA B. et al 2013].

Uma vez concluído o processo de sinterização, o modelo é removido da máquina e sujeito a operações de impregnação para o aumento da resistência mecânica e melhoria da qualidade superficial.

Este processo permite utilizar pós metálicos, tais como, aço ou cobre revestidos com um polímero, os quais permite obter, após infiltração com uma liga metálica, peças metálicas ou cavidades destinadas a moldes.

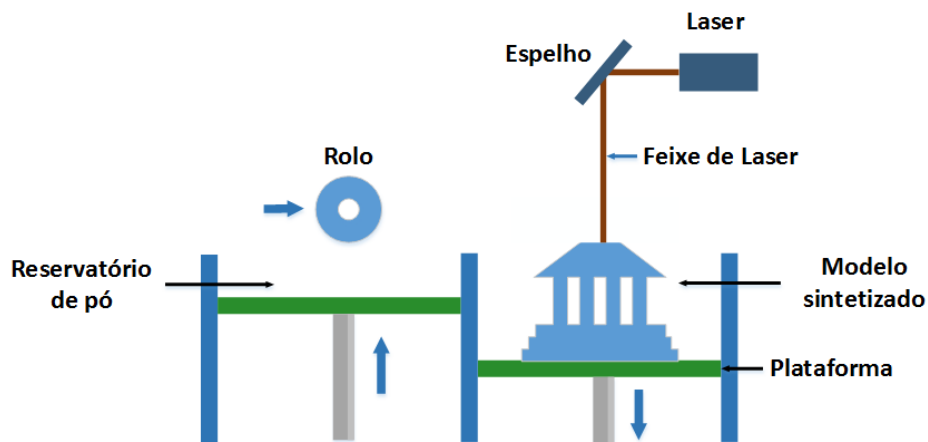


Figura 2.3 - Princípio de funcionamento do sistema de Sinterização Seletiva a Laser.

2.2.5 - Modelação por Deposição de Material Fundido (FDM)

É o segundo processo mais utilizado, consistindo na deposição de um material termoplástico no estado de fusão. Este método de impressão requer um filamento (normalmente um termoplástico, por exemplo, polylactic acid (PLA), ou acrylate-butadiene-styrene,) que é aquecido até ao ponto de fusão e extrudido por um orifício “nozzle” com o formato e tamanho pretendido. Ao ser movimentado por um sistema de três graus de liberdade é possível desenhar formas complexas depositando uma quantidade específica de um termoplástico nos sítios adequados. Normalmente o sistema de extrusão incorpora uma ventoinha para o rápido arrefecimento do material extrudido para que este se fixe no lugar onde é depositado [JOE MICALLEF et al 2015]. Assim que cada camada horizontal é concluída, a mesa de trabalho desce para dar origem a uma nova camada (normalmente distancias que rondam os 50um aos 300um). Este processo repete-se sucessivamente até o modelo estar concluído (Figura 2.4).

Existem diversos materiais que podem ser utilizados neste método, inclusive ceras para aplicação em processos de cera. Este tipo de tecnologia não requer processos de pós-cura e pode ser utilizada em ambientes silenciosos, uma vez que não apresenta ruídos durante o processo de construção do protótipo.

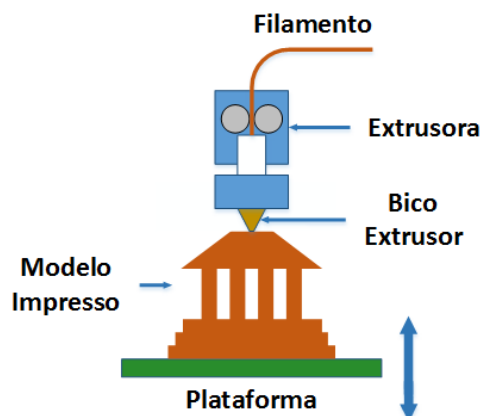


Figura 2.4 - Princípio de funcionamento do sistema de Modelagem por Deposição de Material Fundido.

2.2.6 - Impressão 3D por Jato de Tinta (MJT)

Este é um processo inovador de prototipagem rápida que diminuiu consideravelmente o tempo de manufatura de protótipos. A máquina de impressão tridimensional inicia o processo depositando uma camada de pó numa plataforma, sobre o qual é depositado um fluido ligante com os contornos da primeira fatia do modelo. A plataforma desce, e uma nova camada de pó é depositada sobre a anterior e novamente é depositado um fluido ligante com os contornos da segunda fatia do modelo (Figura 2.5). Este processo é repetido até que o modelo esteja concluído. Este método de impressão assemelhasse com uma impressora de jato de tinta tradicional quando imprime em folhas de papel.

Uma vez concluída a impressão, é removido todo o pó que não recebeu fluido ligante. Em casos específicos, para aumentar a resistência mecânica à peça, ela pode, ser sinterizada e reforçada com outros materiais. Este método de impressão tridimensional possui uma grande vantagem adicional sobre os restantes processos de prototipagem uma vez que não necessita de imprimir material de suporte, pois o próprio pó sem ligante suporta a peça de impressão. O pó removido pode ser reutilizado para outras impressões [VICTORIA ZUKAS, JONAS A. ZUCAS el at 2015].

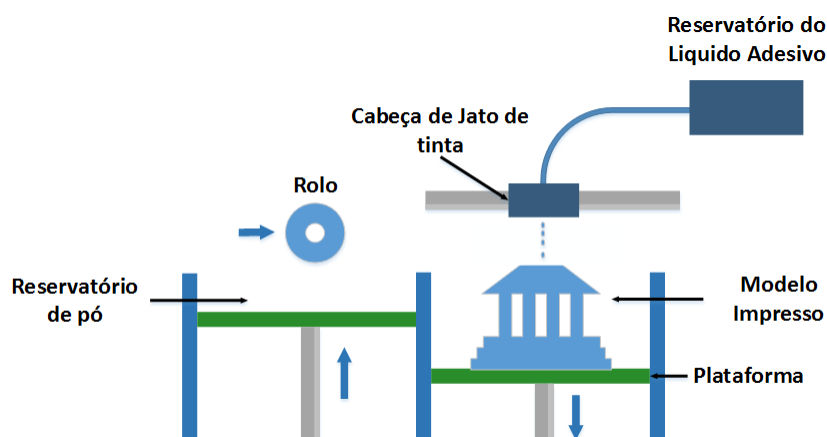


Figura 2.5 - Princípio de funcionamento do sistema de Impressão 3D por jato de tinta.

2.3 - Modelos Tridimensionais

A criação de modelos a três dimensões consiste em desenvolver objetos através de um programa com ferramentas destinadas para este tipo de atividade. Entre os programas mais utilizados atualmente encontramos: o *AutoCAD*, *SoliEdge* e *SolidWorks* (Figura 2.6).

Existem duas abordagens muito utilizadas para o tratamento de modelos. A primeira abordagem é o desenho auxiliar por computador ou DAC, que é um termo que resume a criação, modificação, análise e otimização de modelos, de seguida, a manufatura auxiliada por computador ou CAM, que envolve utilização de sistemas computacionais nas tarefas de planeamento e controle da manufatura destes modelos.

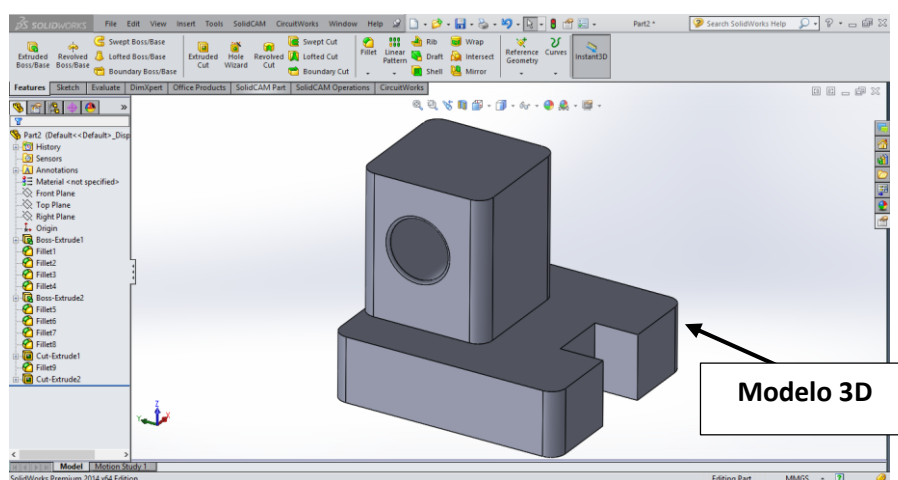


Figura 2.6 - Programa de modelação 3D *SolidWorks* e respetivo modelo 3D.

2.4 - Modelos tridimensionais no formato STL

Outra característica muito importante na impressão 3D é a capacidade de criar qualquer objeto a partir do seu modelo digital. Para isso, o modelo criado deve encontrar-se no formato STL (*STereoLithography*) usualmente compatível com ferramentas CAD, que representa o modelo original recorrendo à união de um conjunto de tetraedros relacionados entre si (Figura 2.7). Este formato descreve as superfícies de um objeto, através dos vértices que compõem cada uma das suas faces, sem nenhuma representação de cor, textura ou outro atributo comum a modelos 3D artísticos [SALEEM HASHMI, et al 2014]. O nível de precisão vai depender do número de facetas triangulares geradas, quando mais densa for maior é a precisão. Cada faceta triangular é definida pelas coordenadas X, Y, Z dos seus vértices, somado aos três componentes de suas unidades de direção normal.

O formato de arquivo STL pode ser definido, no formato ASCII e no formato binário. Os arquivos binários são os mais utilizados uma vez que são mais compactos do que arquivo ASCII.

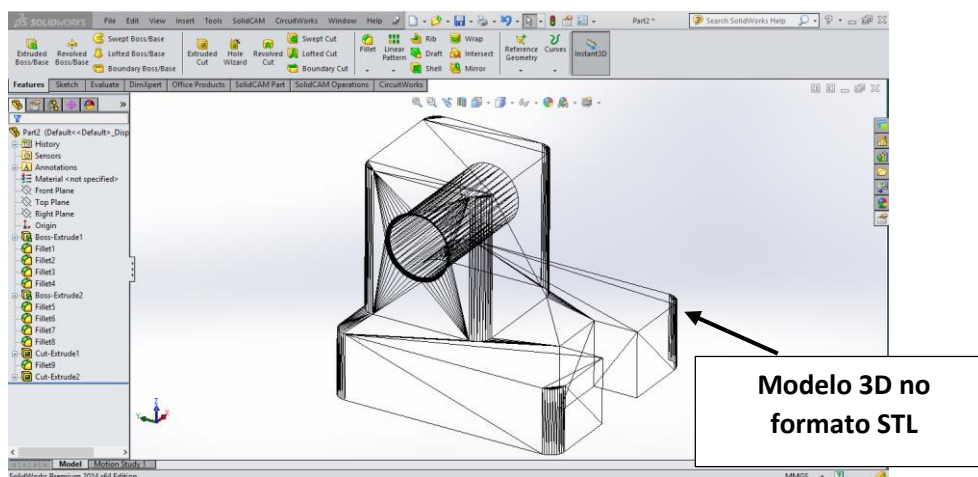


Figura 2.7 - Programa de modelação 3D *SolidWorks* e respetivo modelo 3D no formato STL.

2.5- Programas de corte de modelos digitais

Os programas de corte convertem um modelo 3D digital em um conjunto de comandos G-Code. Trata-se de uma tarefa complexa pois requiere muito processamento

de dados. A forma com que o programa processa esses dados vai determinar a maneira com que a impressora se move.

Estes programas usam algoritmos, que permitem o corte de um ficheiro STL em sucessivas camadas. Cada camada possui um conjunto de dados que são novamente processados de maneira a gerar um conjunto de instruções que são enviadas para a impressora.

Os algoritmos de corte podem variar de programa para programa, o que significa que os comandos gerados também vão ser diferentes. A qualidade e até mesmo a forma como é feita a impressão também vai variar de acordo com o programa utilizado. Alguns programas são desenvolvidos para produzirem impressões de alta qualidade, outros para impressões rápidas e outros destinados a realizarem tarefas especiais [CORNELIUS. T. LEONDES, et al 2003].

Atualmente existem um conjunto de programas que oferecem ferramentas de corte de modelos 3D. Adicionalmente, esses programas permitem outras funcionalidades tais como a visualização do modelo, tratamento do modelo, ajuste do tamanho do modelo e estruturas de suporte. Entre os programas mais conhecidos estão: oSlic3r, Simplify3D (Figura 2.8 a)), e o Cura (Figura 2.8 b)).

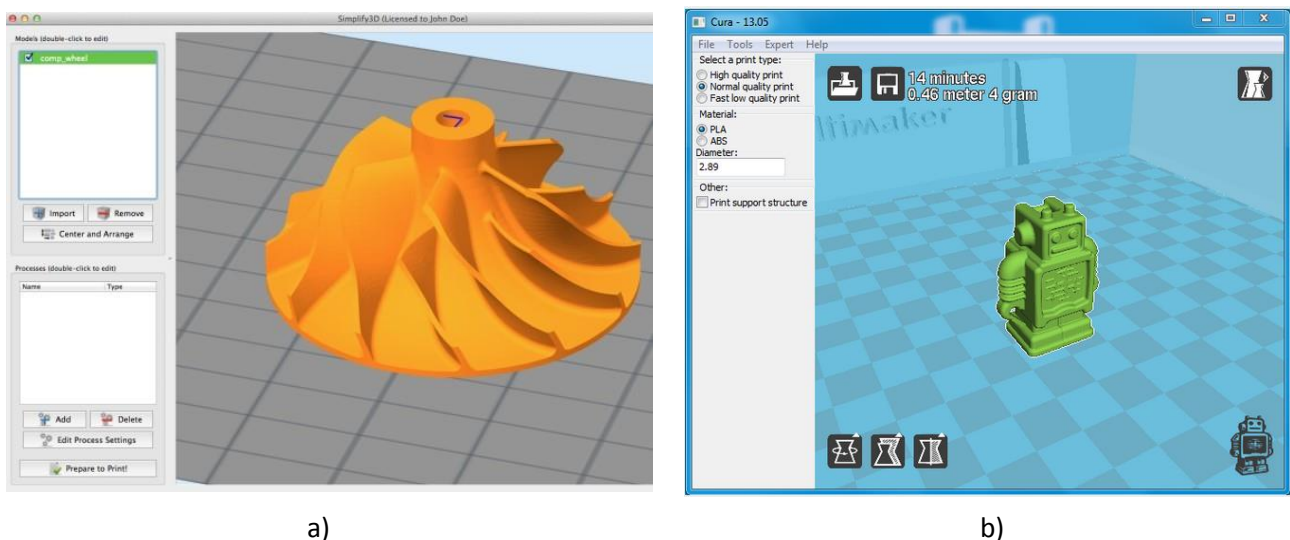


Figura 2.8 - Programas de corte de um modelo digital 3D. a) Programa *Simplify3D* desenvolvido pela *Simplify3D*. b) Programa *Cura* desenvolvido pela *Ultimaker*.

2.6- Materiais Termoplásticos

A tecnologia de impressão de Modelação por Deposição de Material Fundido é um dos métodos mais comuns e baratos de impressão existentes. Este método recorre a filamentos finos de um material termoplástico para a construção de cada camada de um modelo. Estes materiais conferem ao modelo impresso alta durabilidade e resistência [ADDULAKH K. MIKITAEV, et al 2006]. Existe um conjunto de materiais termoplásticos que podem ser aplicados neste tipo de tecnologia. Os principais materiais usados são:

- ***Polylatic Acid (PLA)***: É um material de impressão muito versátil e de custo relativamente baixo. Não é o mais forte dos polímeros disponíveis, mas é extremamente útil, dependendo da sua aplicação. É um material biodegradável, pois deriva do amido de milho. Degrada-se facilmente em água e dióxido de carbono.
- ***Acrilonitrila Butadieno Estireno (ABS)***: É um material termoplástico rígido e leve, com alguma flexibilidade e resistência na absorção de impactos. Tal como os outros termoplásticos, pode assumir quaisquer formas e cores, por moldagem térmica a altas temperaturas e adição de pigmentos. Este material também é muito usado para acabamentos de alto brilho.
- ***Poliamida (PA)***: Mais conhecido pelo seu nome comercial *Nylon*, é um material resistente e de fácil utilização que pode ser utilizado no fabrico de componentes de alta resistência. Tal como o ABS é muito importante manter o *Nylon* seco para evitar o aparecimento de manchas nas peças ou diferenças na viscosidade do material fundido.
- ***Poliestireno Alto Impacto (HIPS)***: É um material muito resistente, semelhante ao ABS, embora não seja a opção mais barata. O bloco de aquecimento do sistema de impressão necessita de ter um controlo de temperatura bastante preciso, caso contrário, haverá inúmeras deformações no modelo impresso. A velocidade de impressão também deve ser ajustada para evitar distorções no modelo.

- **Elastómero Termoplástico (TPE):** Trata-se de um material inovador com propriedades termoplásticas e elastoméricas. É um polímero que combina elevada deformabilidade elástica característica das borrachas vulcanizadas, com as condições de transformação mais favoráveis dos materiais termoplásticos.

2.7 - Sistemas de Extrusão

O sistema de extrusão ou cabeça de impressão é o mecanismo responsável pela deposição de um perfil circular contínuo de um material no ponto de fusão. Este sistema é uma das peças fundamentais da impressão de Modelação por Deposição de Material Fundido (FDM). Como tivemos oportunidade de analisar (secção 2.6), existe uma grande variedade de matérias-primas que podem ser extrudidas, de forma a obter protótipos com as características pretendidas. Estes mecanismos podem ser construídos de diversas formas.

2.7.1 – Extrusor convencional

O mecanismo de extrusão pode-se dividir em duas partes: sistema de tração do filamento, e o sistema de fusão. O sistema de tração é responsável por conduzir o filamento para a câmara de fusão aplicando uma pressão mecânica no mesmo através de rolos ou cremalheiras. Os rolos são o único mecanismo que garantem o fornecimento de material à câmara de fusão. A força aplicada pelo mecanismo de tração deve ser suficiente para superar a queda de pressão através do sistema, que depende das propriedades viscosas do filamento em fusão e da geometria do bico.

Uma vez na câmara de fusão o filamento é aquecido a uma temperatura regulada. O aquecimento é feito através de uma resistência elétrica e controlado por sensores de temperatura. Assim que a temperatura desejada for atingida, o material é extrudido por um orifício com um diâmetro específico (Figura 2.9). Existem diferentes tipos de bicos e métodos de aquecimento que são utilizados dependendo do material a ser impresso.

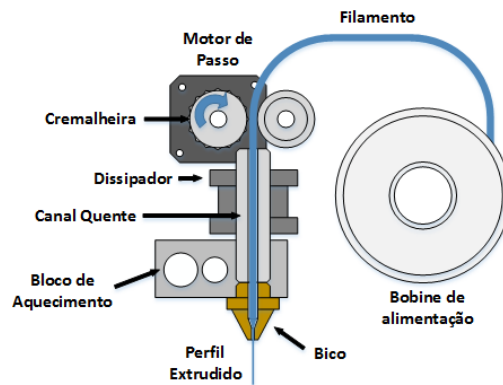


Figura 2.9 - Mecanismo de extrusão que engloba um sistema de tração e de alimentação.

2.7.2 – Extrusor de impressão a cores

A introdução de cor nos modelos impressos na Modelação por Deposição de Material Fundido tem sido cada vez mais procurado pelo consumidor final. Além da funcionalidade do modelo é importante obter um bom aspeto visual. Atualmente existe um conjunto de soluções limitadas que confere a um protótipo um conjunto de combinações de cores desejada.

Uma solução simples passa pelo desenvolvimento de um extrusor de múltiplas entradas mas com um único bico de extrusão com formato que se assemelha a um diamante (Figura 2.10). A geometria do bico deve-se à câmara existente no interior, que serve para fazer a mistura entre os filamentos para obter a cor pretendida. A câmara de mistura é projetada para ter a menor área possível para facilitar as mudanças de cor e para evitar o desperdício do filamento. O bico é desenhado de forma a ser o mais compacto possível para garantir o rápido aquecimento dos filamentos.

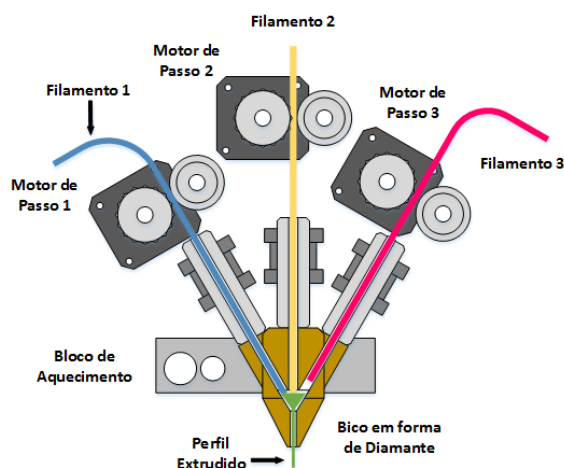


Figura 2.10 - Sistema de extrusão multicor.

Capítulo 3

3 – Estrutura da impressora 3D

A estrutura mecânica utilizada numa impressora 3D (FDM) é um fator que influencia a qualidade dos modelos impressos. Deste modo, este capítulo é dedicado à análise dos principais constituintes de uma impressora 3D. É feito um levantamento das suas principais características não só para entender melhor o seu funcionamento, mas também para obter conhecimento necessário para evitar problemas que podem ocorrer no futuro.

Neste capítulo é apresentado os principais constituintes e o modo de operação da impressora utilizada nesta dissertação. Ao contrário do que é dito no título deste projeto não será desenvolvido uma impressora 3D uma vez que, uma impressora 3D (FDM) *BEETHEFIRST* foi gentilmente cedida pela empresa *BEEVERYCREATIVE* para realização do projeto. As secções seguintes fazem o levantamento técnico do equipamento de impressão tridimensional utilizado. É feito o estudo da cinemática utilizada, técnicas de construção e a importância da estrutura da impressora.

3.1 – Cinemática

Para controlar o movimento do extrusor, as impressoras 3D usam diferentes abordagens ou arquiteturas. A arquitetura escolhida por cada impressora demonstra a maneira em que ela se move no espaço tridimensional. O movimento pode ser obtido de diferentes maneiras, mas a abordagem mais comum é a arquitetura cartesiana. Impressoras de arquitetura cartesiana usam o princípio básico de movimentar a cabeça de impressão para um ponto específico. Estas possuem mecanismos de movimento no eixo X,Y e Z, que permitem posicionar o sistema de extrusão em qualquer ponto no espaço [JOAN H., RICH C., et al 2015].

As impressoras que adotam a arquitetura cartesiana são de longe das mais usadas no mercado de consumo e mercado profissional, uma das razões deve-se à

simplicidade da matemática envolvida no controlo dos movimentos. Além disso, a utilização desta arquitetura, deve-se às grandes semelhanças que existem entre os sistemas de coordenadas cartesianas usados nos programas CAD e de modelação 3D.

A impressora *BEETHEFIRST* usada neste projeto é dotada de uma arquitetura típica cartesiana, definida por eixos X,Y e Z. Esta impressora possui uma plataforma com movimento em Y e Z e extrusor com movimento em X (Figura 3.3).

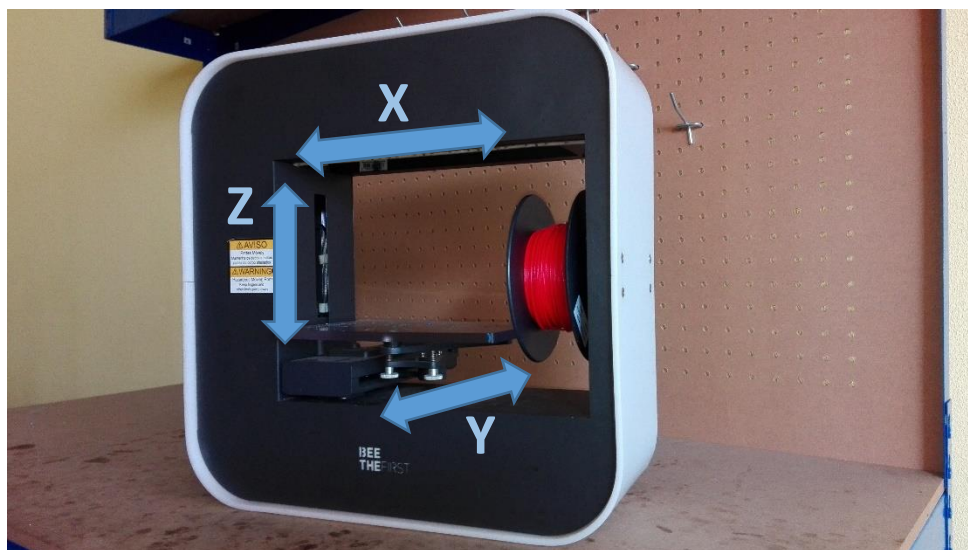


Figura 3.1 - Sistema cartesiano da Impressora 3D *BEETHEFIRST*.

3.1.1 – Particularidades do Sistema

Um aspeto muito interessante dos fabricantes de impressoras 3D é que cada um desenvolve o seu mecanismo de cinemática cartesiana. Isto deve-se ao que o fabricante espera obter com o seu produto e que vai tornar diferente de um produzido por outro fabricante. A estrutura mecânica utilizada influencia o custo da impressora, a qualidade das impressões, a velocidade a que conseguem imprimir, o tamanho da impressora e a dificuldade de construção.

O custo associado ao fabrico da impressora é dos fatores mais importantes para os fabricantes e para os consumidores. O custo varia com a topologia escolhida, quanto mais complexa for, mais materiais são necessários e com isso maior é o custo final.

A qualidade de impressão e a velocidade que a impressora consegue imprimir estão relacionadas, ou seja, a velocidade é limitada pela qualidade de impressão. A

maior parte das impressoras conseguem mover-se muito mais rápido do que conseguem imprimir, no entanto, para velocidades elevadas estas não conseguem manter uma qualidade de impressão aceitável. Isto está relacionado com a quantidade de massa que elas movem e com a capacidade estrutural da impressora tem que lidar com o *stress* gerado pelas massas dos objetos em movimento.

A qualidade de impressão é afetada pela inércia, que aumenta proporcionalmente com o aumento da massa dos objetos em movimento. A razão pelo qual afeta a qualidade de impressão deve-se quando a impressora se move numa direção e necessita de mudar de direção, a inercia irá resistir a essa variação, e por causa da relação da inércia com a massa, a mudança de direção será mais difícil quando maior for essa massa.

3.1.2 – Importância da Estrutura da Impressora

A forma de construção das impressoras 3D é um dos fatores mais importantes no que toca à qualidade de impressão e fiabilidade. Qualquer outro componente da impressora pode estar projetado da perfeição mas se a estrutura que suporta a impressora for de fraca qualidade os resultados obtidos também serão fracos.

Além de suportar todos os constituintes da impressora, a estrutura mantém todos os componente alinhados e estáveis. Esta deve ser pensada de forma a suportar os momentos de força e de inércia causados por todas as massas em movimento nos eixos da impressora, mas também manter todos os eixos devidamente alinhados e manter a calibração da impressora.

A flexibilidade é um dos piores inimigos da qualidade de impressão. Quando existe flexibilidade na estrutura da impressora, o momento gerado pelos componentes em movimento dará resultado a impressões de baixa qualidade.

3.2 – Componentes de Movimento Linear

A estrutura da Impressora 3D é a fundação para qualquer outro componente, o que a torna muito importante. Mas mesmo um quadro muito bem projetado não é útil a não ser que possua algum tipo de sistema mecânico de movimento. A maneira com que isso é realizado varia de impressora para impressora.

Qualquer que seja o sistema de movimento escolhido é muito importante que esse movimento esteja aplicado a um único eixo numa única dimensão. Outros tipos de movimentos gerados externamente são considerados como indesejáveis, porque, introduzem movimentos não desejáveis em outros eixos [ALICI GIBB, et al 2015].

Além disso, o movimento de um eixo deve ser o mais suave e sem atrito possível. Quanto menor for o atrito no sistema, menor é a força necessária para mover um eixo. A fricção aumenta a força necessária para gerar movimento em um eixo. Para movimentos lineares suaves a melhor opção é a utilização de guias lineares. As guias lineares reduzem a fricção existente no movimento e permitem movimentos suaves e precisos.

3.2.1 – Guias Lineares

São componentes mecânicos que providenciam movimentos lineares muito suaves e precisos. As guias lineares são constituídas por dois elementos, um carril com uma superfície bastante polida e por um a vagão. O conceito parece simples, mas cada componente individual desempenha uma função muito importante.

A execução de múltiplos movimentos ao longo do tempo pode deteriorar a superfície da guia e consequentemente aumentar a fricção. Desse modo, para evitar a fricção, as guias devem possuir carris com superfícies duras e muito suaves.

As guias podem ser construídas de diferentes tipos de materiais, o mais comum é a utilização do aço inoxidável. Este tipo de material possui as características desejadas mas também é resistente à corrosão e de baixo custo.

A impressora *BEETHEFIRST* utilizada neste projeto possui guias linear de alta qualidade e de alta precisão de maneira a obter a precisão desejada para cada eixo. Na Figura 3.2 é possível visualizar as guias utilizadas na impressora 3D.

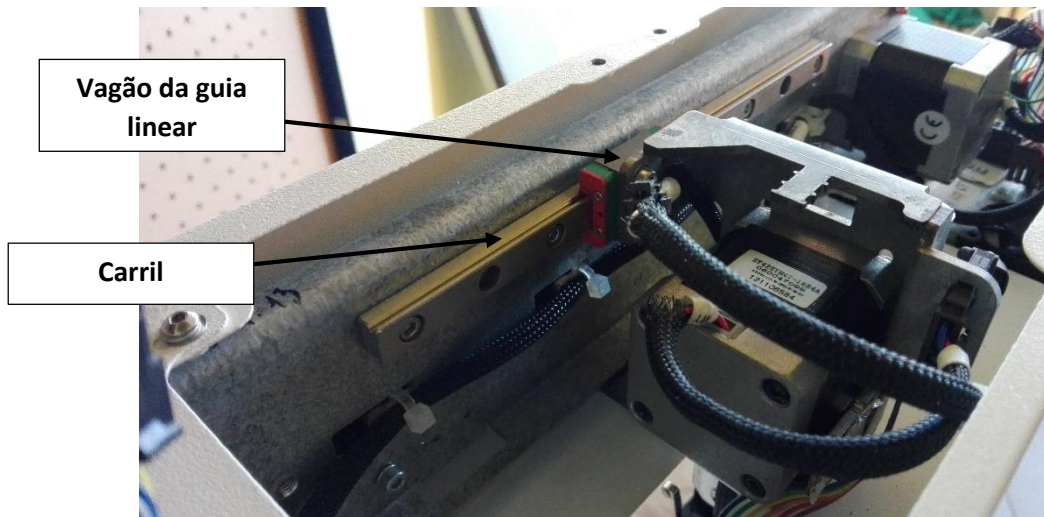


Figura 3.2 - Sistema de movimento linear utilizado na *BEETHEFIRST*.

3.2.2 – Correias e Polias

As correias e as polias são dos sistemas mecânicos mais simples de transmissão de movimento, mas também são usadas para simplificar sistemas mecânicos de acionamento. Trata-se de um sistema mecânico muito básico e muito simples. Uma polia que está acoplada a um motor que transfere a rotação para uma segunda polia através de uma correia. Se as duas polias são do mesmo tamanho, o sistema é exclusivamente destinado à transferência de movimento visto que a razão de desmultiplicação é de 1:1.

O uso de múltiplas polias permite obter desmultiplicações e consequentemente vantagens mecânicas. Sistemas com desmultiplicações permitem levantar cargas bastantes pesadas. Da mesma maneira, um sistema desses permite a um motor de baixa potencia movimentar cargas superiores ao seu peso.

Embora seja uma configuração praticamente padrão, a forma como são utilizadas pode variar consoante a impressora. Na maioria das impressoras 3D são usadas correias e polias dentadas. Este tipo de correias assemelham-se às existentes no motor de um automóvel. Tratam-se de correias de borracha e de polias em alumínio. Esta configuração garante que a correia não escorregue e não estique (Figura 3.3).

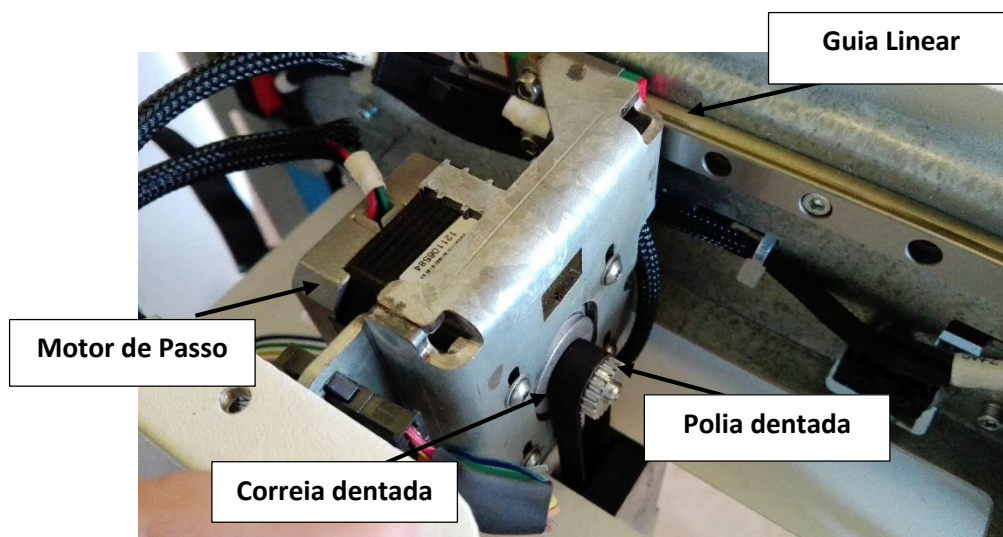


Figura 3.3 - Sistema de transferência de movimento linear da *BEETHEFIRST*.

3.2.3 – Motores de Passo

Existem vários tipos de motores tecnicamente capazes de gerar movimento. No entanto, existe um tipo de motor que encaixa na perfeição para realizar este tipo de tarefa, o motor de passo.

A principal característica do motor de passo é a capacidade de rodar de uma forma muito precisa. Esta precisão é importante para produzir impressões detalhadas e exatas. Isto é feito rodando em pequenos passos em vez de uma rotação contínua. Um motor de passo usado na maioria das impressoras 3D possui 200 passos para cada rotação completa. Uma vez que o motor consegue mover um único passo de cada vez, significa que consegue rodar 1.8 graus por cada passo. Adicionalmente, uma técnica chamada *microstepping* consegue aumentar a resolução de cada passo. O sistema de micro passo é conseguido através de um controlador de motor de passo. A maioria consegue que cada passo individual seja dividido em 16 passos mais pequenos. O alto nível de precisão torna este tipo de motores ideais para máquinas de impressão 3D.

A impressora *BEETHEFIRST* utiliza três motores de passo com uma resolução de 200 passos por volta completa. Tratam-se de motores *NEMA17* muito fiáveis e projetados exclusivamente para impressoras 3D (Figura 3.4).



Figura 3.4 - Motores Nema17 aplicados os eixos da BEETHEFIRST.

3.3 – Plataforma de Impressão

Cada componente da impressora 3D por simples ou complicado que seja desempenha um papel importante para o bom funcionamento da impressora. A plataforma de impressão não é uma exceção, apesar de não parecer um dos componentes mais relevantes, desempenha um papel crucial na impressão.

A plataforma de impressão é o local onde o material termoplástico em estado de fusão é depositado. Para uma correta impressão é necessário garantir que o material depositado adquira uma boa aderência com a plataforma para evitar que o modelo descole durante a impressão. A aderência do material vai depender da superfície da plataforma, do material com que ela é feita e dos tratamentos que lhe são aplicados.

Existe um conjunto de materiais que podem ser usados para a construção da plataforma, tal como vidro, acrílico, alumínio e cobre. Estes materiais permitem obter superfícies muito planas. Para que haja uma boa aderência é necessário garantir que a plataforma seja o mais plana possível, para que, durante o ciclo de impressão em qualquer ponto em que o extrusor se encontre, a distância entre extrusor e a plataforma seja sempre a mesma. Além disso, esta deve ser contruída com materiais que permitam que o material extrudido consiga realmente aderir. Alguns materiais possuem superfícies demasiado lisas e o filamento extrudido simplesmente não consegue aderir. O material ideal deve permitir a boa aderência do filamento mas também permitir descolar facilmente o modelo assim que a impressão estiver concluída.

A impressora *BEETHEFIRST* utilizada neste projeto opera com uma plataforma em acrílico com uma espessura de 10mm. Para a impressão, a plataforma leva um tratamento superficial (secção 3.3.2) para garantir máxima aderência possível (Figura 3.5).

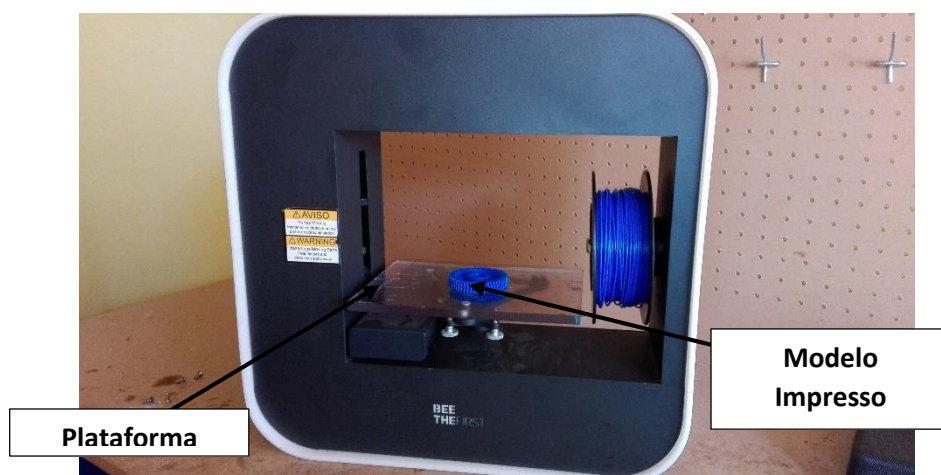


Figura 3.5 - Modelo impresso em uma plataforma de acrílico, usada em impressões na *BEETHEFIRST*.

3.3.1 – Mesa aquecida

A mesa aquecida é mais um dos métodos utilizados para a redução das irregularidades da plataforma de impressão. Trata-se de uma placa de circuito impresso especialmente desenhada para o aquecimento da plataforma. As mesas aquecidas são constituídas por uma resistência de aquecimento e um termistor para medição de temperatura. A temperatura da mesa é controlada pela placa de controlo da impressora 3D, para um intervalo de temperaturas entre 60 °C e os 120 °C.

A mesa de aquecimento permite combater as imperfeições da plataforma aquecendo as primeiras camadas impressas. Mantendo as primeiras camadas a uma temperatura elevada garante maior dilatação do material extrudido e com isso o aumento da área em contacto com a plataforma. Para materiais como o *ABS*, a mesa aquecida é mesmo um requisito, esta é uma das razões pela qual algumas impressoras 3D vêm com mesa aquecida e outras não. Geralmente as impressoras de baixo custo não possuem mesa aquecida. Estas conseguem obter boas impressões utilizando apenas

materiais à base de PLA. Para que possam imprimir em ABS necessitam de uma mesa aquecida (Figura 3.6).

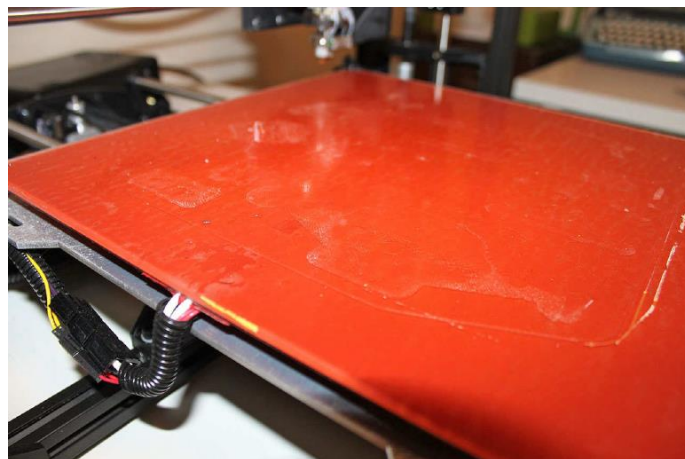


Figura 3.6 - Mesa aquecida aplicada a uma plataforma de impressão.

3.3.2 – Tratamento da superfície de impressão

A maioria dos materiais utilizados na construção das plataformas de impressão por si só não possuem a aderência necessária para fixar o filamento extrudido. Para garantir a fixação do filamento extrudido são aplicados alguns tratamentos à plataforma de impressão. Esses tratamentos passam pela utilização de fitas adesivas e colas. Para o tratamento da superfície da plataforma os materiais mais utilizados são:

Fita adesiva de pintura: É um dos materiais mais utilizados no tratamento das superfícies de impressão. A fita é aplicada à plataforma de maneira a cobrir toda a área de impressão (Figura 3.7).



Figura 3.7- Aplicação de fita de pintura em uma plataforma de impressão.

A textura da fita permite que o material extrudido adira com bastante facilidade. Este tipo de fita funciona melhor para materiais como o PLA e em mesas não aquecidas. Visto que se trata de um método de baixa durabilidade é necessário substituir a fita ao final de algumas impressões.

Cola adesiva: Trata-se de uma cola de acetato de Polivinil muito utilizada por dar boa aderência à plataforma de impressão. Para ser aplicada, é necessário misturar a cola com uma quantidade de água para uma proporção de 1:1. Utilizando um pequeno pincel é aplicada a mistura obtida por toda a plataforma de impressão. Este tipo de cola quando usada juntamente com a fita adesiva de pintura consegue eliminar quase por completo as irregularidades da mesa para impressões com PLA (Figura 3.8). Em contrapartida a durabilidade da fita de impressão irá diminuir drasticamente em cada impressão.



Figura 3.8 - Aplicação de uma adesiva desenvolvida pela 3DSytems em uma plataforma de impressão.

Fita Kapton: Trata-se de uma fita muito resistente, flexível e com propriedades de isolamento térmico e elétrico. A fita *Kapton*, assim como a fita adesiva de pintura, possui uma superfície onde o filamento extrudido adere com bastante facilidade. Materiais como o ABS também conseguem aderir com bastante facilidade à fita *Kapton*, o que a torna bastante útil quando combinada com uma mesa aquecida. Além disso, devido a sua elevada resistência, pode ser removida inúmeras vezes sem sofrer qualquer tipo de dano (Figura 3.9). O seu único inconveniente é o custo associado.

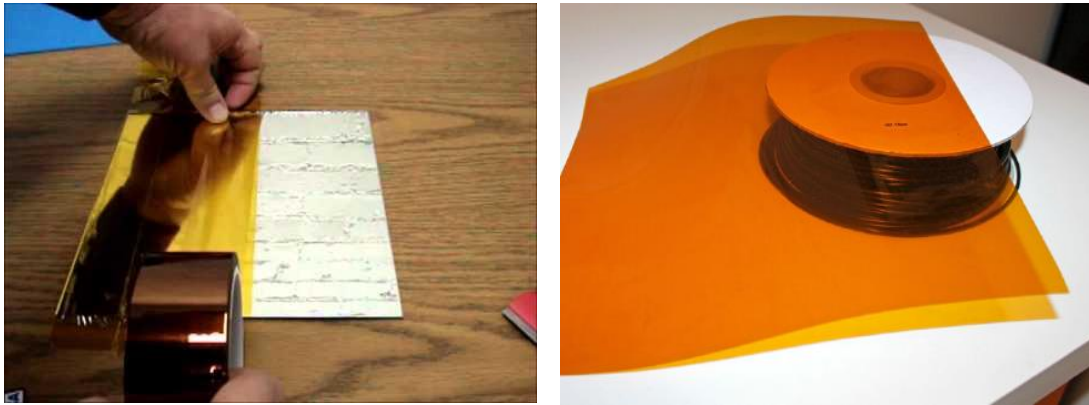


Figura 3.9 - Aplicação de fira adesiva *Kapton* em uma plataforma de impressão.

3.4 - Eletrônica de Controlo

Para a monitorizar e controlar os componentes elétricos da impressora 3D é necessário uma placa de controlo. A placa de controlo é um pequeno “computador” com a funcionalidade de controlar o comportamento da impressora. Este é responsável por interpretar os comandos gerados pelo programa de corte e usar toda essa informação para controlar a impressora.

Atualmente está disponível uma variedade de placas de controlo de diferentes tipos e estilos. Existem as de *open-source* que funcionam com vários tipos de impressoras e outras que funcionam para uma impressora específica.

Existem dois fatores que se deve ter em conta na escolha de uma placa de controlo para uma impressora 3D que pode fazer toda a diferença para quem as utiliza. O utilizador deve ter em conta as expansões que a placa permite fazer e quais os programas de corte compatíveis.

A quantidade de expansões que a placa permite realizar é muito importante sempre que existe a necessidade de atualizar ou modificar a impressora. Se for necessário adicionar um extrusor, uma mesa aquecida, um LCD, ou outro componente, a placa de controlo deve de estar preparada para suportar todos eles. Algumas delas simplesmente não possuem as conexões necessárias para qualquer tipo de alteração, ou, mesmo tendo as ligações físicas necessária não possuem *firmware* que suporta o controlo dessas expansões [KEVIN ROEBUCK , et al 2011].

A compatibilidade com programas de corte é também uma das características que se deve de ter em conta. Alguns dos programas funcionam para um grupo muito

específico de placas de controlo e vice-versa. Este é um caso que normalmente ocorre quando os fabricantes de impressoras 3D pretendem ter total controlo da impressão 3D. Esses fabricantes desenvolvem placas de controlo que funcionam exclusivamente para as impressoras que fabricam e que funcionam com programas de corte e de controlo que desenvolvem.

A impressora *BEETHEFIRST* utilizada neste projeto utiliza uma placa de controlo *open-source* desenvolvida pela *BitBox*. Designada por R2C2 (Figura 3.10), trata-se de placa compatível com a maioria das impressoras *RepRap* existentes no mercado mas também com os principais programas de corte e de controlo tal como o Cura, Slic3r, entre outros. A placa de controlo possui um microcontrolador ARM 32 bits a uma frequência de *clock* de 100MHz e um módulo de USB integrado. Além disso possui 4 módulos de controlo de motor de passo, entrada para sensores de fim de curso, entrada para mesa aquecida, conector para cartão SD, e 2 conectores de 15 pinos para expansões.

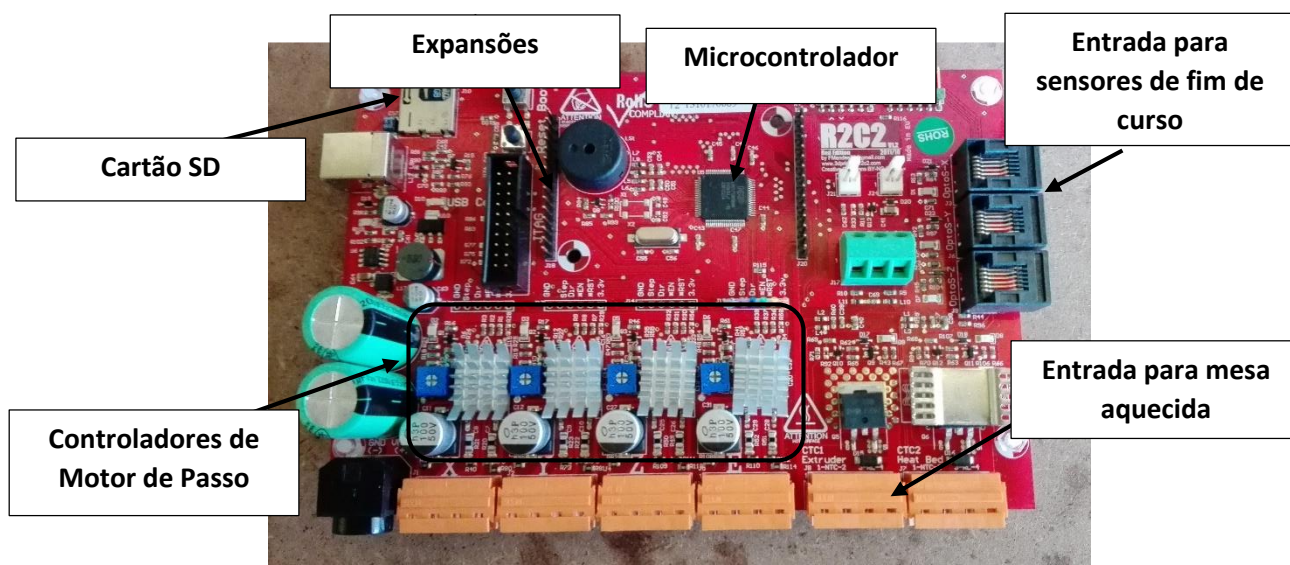


Figura 3.10 - Placa de controlo R2C2 utilizada na impressora *BEETHEFIRST*.

3.4.1 – Microcontrolador

A placa de controlo é responsável por controlar os componente elétricos assim como a interação com o PC e a impressora 3D. O componente principal da placa de controlo é o microcontrolador. O microcontrolador executa as instruções geradas pelo programa de corte tal como uma CPU de um computador.

A placa de controlo *R2C2* utiliza um microcontrolador da *NXP LPC1758 ARM Cortex -M3* destinado para sistemas embebidos para aplicações de alto nível de integração e de baixo consumo. Este microcontrolador permitir operar até uma frequência de CPU de 100MHz. Além disso, possui um conjunto alargado de periféricos, tais como, interface SPI, interface I2C, 6 entradas de ADC de 12 bits, 1 DAC de 12bits e 6 saídas de PWM (Figura 3.11).

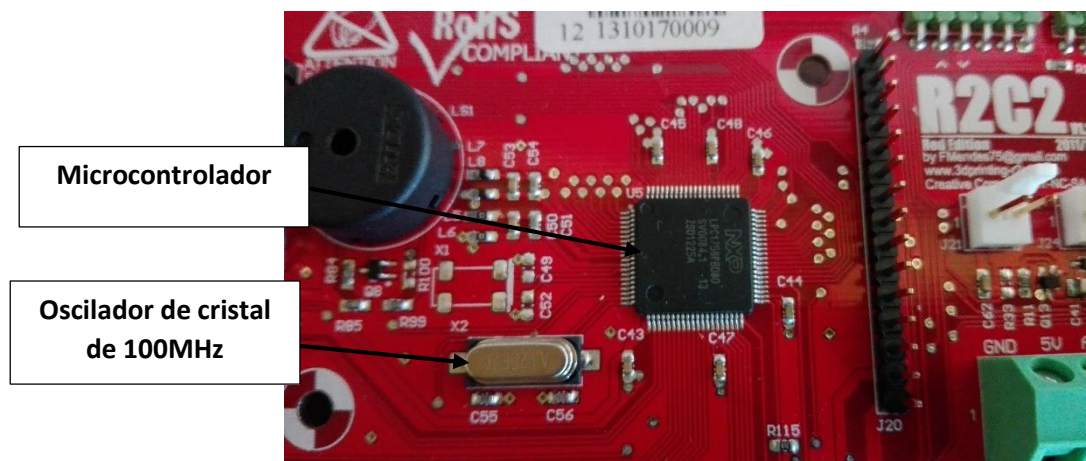


Figura 3.11 - Microcontrolador utilizado na placa de controlo *R2C2*.

3.4.1 – Firmware

O *firmware* é um conjunto de instruções operacionais programadas diretamente no *hardware* de um equipamento eletrónico. Apesar da grande semelhança entre *firmware* e *software*, cada um desempenha funções diferentes. O *firmware* faz a leitura das instruções e executa diretamente via *hardware* enquanto o *software* faz a leitura das instruções mas só as executa indiretamente. Uma vez que o *firmware* controla diretamente o *hardware*, este deve de ser escrito exclusivamente para o *hardware* que será usado.

Nas impressoras 3D, o *firmware* é gravado na *EEPROM* incorporada no microcontrolador. Neste caso todas as funcionalidades da impressora são controladas pelo *firmware* instalado na própria placa de controlo.

Apesar da existência de inúmeras placas de controlo, estas são desenhadas de maneira similar, o que significa que um único *firmware* pode ser usado na maioria das placas. Só necessita de pequenas alterações para que funcione corretamente em cada

uma delas. Essas alterações são feitas pelo fabricante da impressora ou até mesmo por quem as vai adquirir.

Além disso, a maioria das placas de controlo possuem *firmware* que permite ser configurado mesmo após gravado na *EEPROM* do microcontrolador. Isto permite que o utilizador ajuste alguns parâmetros tais como, o tamanho da área impressão, temperaturas de extrusão, ajustes no número de passos por milímetro para cada motor, entre outros.

3.4.2 – Cartão SD

Uma das vantagens que a maioria das placas de controlo possuem é o suporte para cartão *SD* (*Secure Digital Card*). O normal é existir uma ligação física entre o computador e a impressora 3D durante o processo de impressão. O programa de controlo instalado no computador necessita de enviar as instruções de forma continua para a impressora. No entanto as instruções são geradas previamente pelo programa de corte. Durante o envio das instruções o computador não faz qualquer tipo de processamento de dados, em vez disso, limita-se a guardar as instruções e enviar cada uma delas para a impressora.

Uma vez processadas todas as instruções de controlo, o computador não é mais necessário, em vez disso, as instruções podem ser salvas em um cartão de memória SD e lidas diretamente a partir da placa de controlo.

O suporte para cartão SD (Figura 3.12) possui varias vantagens, a mais óbvia é não ter que deixar o computador ligado à impressora enquanto um modelo esta a ser impresso. Também torna a impressão mais fiável pois deixamos de ter um computador como meio de processamento.

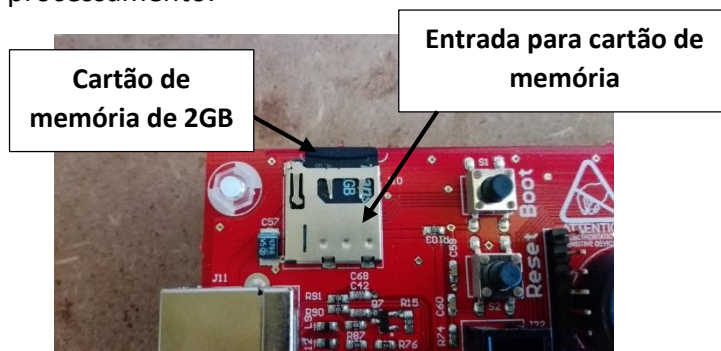


Figura 3.12 - Slot para cartões de memória utilizado na placa de controlo R2C2.

3.4.3 – Sensores de fim de curso

Os sensores de fim de curso são componentes com o propósito de dizer a impressora 3D quando é que ela atingiu o limite de cada um dos seus eixos. Estes desempenham uma função muito importante pois é a única maneira que a impressora tem de saber onde é o ponto zero de cada eixo. Se não forem utilizados fins de curso, é necessário posicionar manualmente o extrusor todas as vezes que a impressora for utilizada, o que pode ser extremamente difícil no caso do eixo Z pois necessita de estar a uma distância muito precisa do extrusor.

Este tipo de sensores são componentes normalmente baratos. Isto deve-se ao facto de serem simplesmente interruptores. As características mais importantes de um sensor de fim de curso é a sensibilidade e a repetibilidade. Eles necessitam de ser acionados pelo mais suave toque e exatamente à mesma distância. Existem dois tipos de sensores de fim de curso, os mecânicos e os óticos.

Os sensores mecânicos são dos mais simples, baratos e provavelmente dos mais fiáveis dos sensores de fim de curso. Este tipo de interruptor consiste em um pequeno braço de metal ligado ao corpo do interruptor. Quando o extrusor, plataforma ou mesmo o eixo Z atingem os limites dos eixos, estes acionam o braço e consequentemente mudam o estado do interruptor. Quando a placa de controlo deteta a mudança de estado do interruptor, ela sabe que um eixo em particular atingiu o seu limite (Figura 3.13 a)).

Os sensores óticos possuem a mesma função do que os sensores mecânicos. Mas ao invés de serem acionados através de um contacto físico são acionados através da variação de luz. A variação de luz é detetada através de um interruptor sensível á luz. O interruptor consiste em um emissor e um recetor (foto-transístor) virados um para o outro. O emissor emite um feixe de luz infra vermelha que será recebido pelo recetor. Quando o feixe de luz é cortado o recetor deixa de receber luz e consequentemente o interruptor é ativado (Figura 3.13 b)). Tal como o sensor mecânico, a placa de controlo vai detetar a variação de estado do interruptor e tomar as devidas ações.

Os sensores de fim de curso podem ter duas utilidades quando utilizados numa impressor 3D. Para além de determinar o ponto zero de cada eixo, servem como

sistemas de proteção/limitação de cada eixo. Se por algum motivo um dos eixos mover-se de uma forma descontrolada, os sensores que limitam o percurso máximo do eixo devem de ser capazes de detetar e de atuar providenciando um corte elétrico no sistema de movimento desse eixo, de maneira a evitar que a impressora seja danificada [CHRISTOPHER BARNATT, et al 2013].

Na impressora *BEETHEFIRST* são utilizados três sensores mecânicos (Figura 3.13 a)) cada um deles é responsável por um único eixo. Este tipo de sensor é bastante fiável e fácil de utilizar.

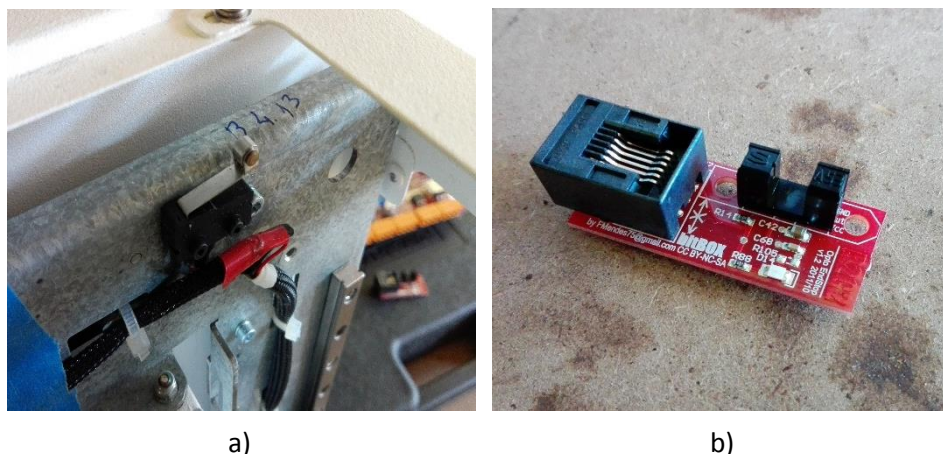


Figura 3.13 - Sensores de fim de curso utilizado em uma impressora 3D. a) Sensor Mecânico. b) Sensor Ótico

3.4.4 – Controlador de Motor de Passo

Os controladores de motor de passo contêm um circuito integrado que alimenta os motores isoladamente da alimentação do microcontrolador. O microcontrolador não consegue fornecer potência suficiente para os motores de passo. Este é o motivo pelo qual é utilizado um circuito integrado que permite a alimentação e o controlo dos motores.

Outra vantagem dos drivers de motores de passo é que conseguem oferecer opções de micro passos. O sistema de micro passo permite reduzir a vibração dos motores ou mesmo evitar que entrem em ressonância a certas velocidades.

A placa de controlo *R2C2* utilizada para o controlo da impressora *BEETHEFIRST* possui 4 controladores para quatro motores de passo (Figura 3.14). Parte desses

controladores, mais precisamente três, são destinados aos eixos X,Y e Z e um quarto destinado ao eixo E. O eixo E é um eixo adicional destinado à tração do filamento.

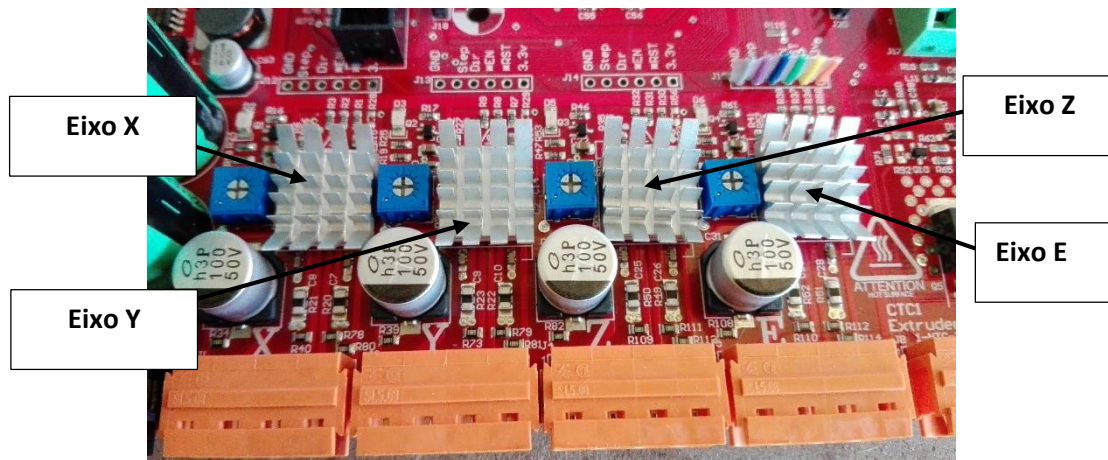


Figura 3.14 - Controladores de motor de passo para cada eixo da impressora.

Capítulo 4

4 - Sistema de extrusão ajustável

O sistema de extrusão é o componente chave para o funcionamento das impressoras 3D do tipo FDM. Os sistemas de extrusão são usados de muitas maneiras para o fabrico de peças, mas a tecnologia aqui apresentada é destinada exclusivamente às impressoras 3D do tipo FDM.

Em termos gerais, a extrusão usada em sistemas de impressão 3D do tipo FDM é um processo que deposita um material termoplástico em uma plataforma de impressão. O material é extrudido por um bico com um furo circular muito fino, o diâmetro do furo vai depender da qualidade de impressão que se pretende obter. Uma vez extrudido, o material é depositado a uma certa velocidade ao longo da plataforma de impressão.

Este processo de impressão é relativamente lento quando comparado com outras tecnologias do mesmo ramo. A velocidade de impressão não está relacionada com a velocidade em que a máquina realmente consegue atingir, mas sim com as limitações da estrutura da impressora, da complexidade do modelo impresso e pelo número de percursos calculados pelo programa de corte.

No presente capítulo é demonstrado um método de extrusão inovador chamado de extrusor ajustável, que permite obter impressões pelo menos duas vezes mais rápida do que os sistemas convencionais. Este sistema acelera o processo de impressão uma vez que reduz significativamente o número de trajetórias calculadas pelo programa de corte. Quanto menor for o número de trajetórias realizadas, mais rápido é a impressão e menor é o desgaste da impressora.

Ainda neste capítulo, é demonstrado a maneira em que o material termoplástico é depositado e os fatores que influenciam essa disposição. É também apresentado a idealização e o protótipo do extrusor ajustável.

4.1 – Extrusão de um material em estado de fusão

Ao contrário do que se pensa, a extrusão e deposição de um material fundido é um processo que possui alguma complexidade. Existe um conjunto de parâmetros que influencia este processo, tal como, a temperatura de extrusão, a velocidade de extrusão, o tempo de arrefecimento e até o tipo de material extrudido. Para impressões de qualidade, cada parâmetro deve ser devidamente controlado, caso contrário, o número de imperfeições e impressões falhadas vai aumentar significativamente.

Dos parâmetros de controlo de extrusão descritos, existem dois que requerem especial atenção, a temperatura de extrusão e o tempo de arrefecimento. A qualidade de impressão obtida nos modelos descreve a forma com que estes dois parâmetros são controlados.

A temperatura em que o material é extrudido deve ser rigorosamente controlada, caso contrário a probabilidade do sistema de extrusão falhar será bastante elevada. Se a temperatura do extrusor estiver abaixo de um valor mínimo necessário para que o material extrudido entre em estado de fusão, a força exercida pelo sistema de tração irá aumentar o que poderá danificar o motor de tração ou danificar o filamento. Se a temperatura estiver acima de um valor máximo estabelecido pelas propriedades do material, este poderá entrar em um estado de ebulição ou até mesmo de combustão. Os valores máximos e mínimos de temperatura são estabelecidos pelas propriedades dos materiais, que podem variar significativamente dependendo do material que se está a usar. Se consideramos que o material fundido se encontra a uma temperatura ideal para o correto funcionamento do sistema de extrusão, a qualidade de impressão já não vai depender da temperatura mas sim do tempo de arrefecimento.

O tempo de arrefecimento é um parâmetro definido pelo programa de corte que indica o tempo necessário que um material extrudido necessita de ser arrefecido até que outro seja depositado sobre ele. Normalmente o tempo de arrefecimento não é superior a 5 segundos para a maioria das impressões. O tempo de arrefecimento pode ser reduzido se for adicionado um sistema de arrefecimento, por exemplo um ventilador, no entanto se este sistema for mal projetado e arrefecer o filamento rápido demais, fará com que ele não adira a plataforma de impressão. Além disso o

arrefecimento excessivo pode causar baixa resistência mecânica nos modelos impressos.

4.1.1 – Acabamento superficial

O acabamento superficial é um dos aspetos mais importantes para todos aqueles que pretendem obter impressões com finalidades estéticas, como por exemplo, esculturas, maquetas, entre outros.

Uma característica que está presente em todos os métodos de prototipagem rápida e que determina a qualidade superficial do modelo impresso é o efeito escada. O efeito escada é causado pela conversão de um modelo digital de três dimensões para uma aproximação de um conjunto sucessivo de cortes de duas dimensões. O efeito escada é mais visível quanto maior foi a inclinação do modelo [GREG NORTON, et al 2015]. Este fica mais pronunciado se o ângulo da superfície aumentar ao longo do eixo Z. O efeito escada é maior quando menor for a resolução do modelo impresso e vice-versa. A Figura 4.1 mostra o efeito escada e o erro ocorrido para um modelo de baixa resolução (Figura 4.1 a)) e para um modelo de alta resolução (Figura 4.2 b)).

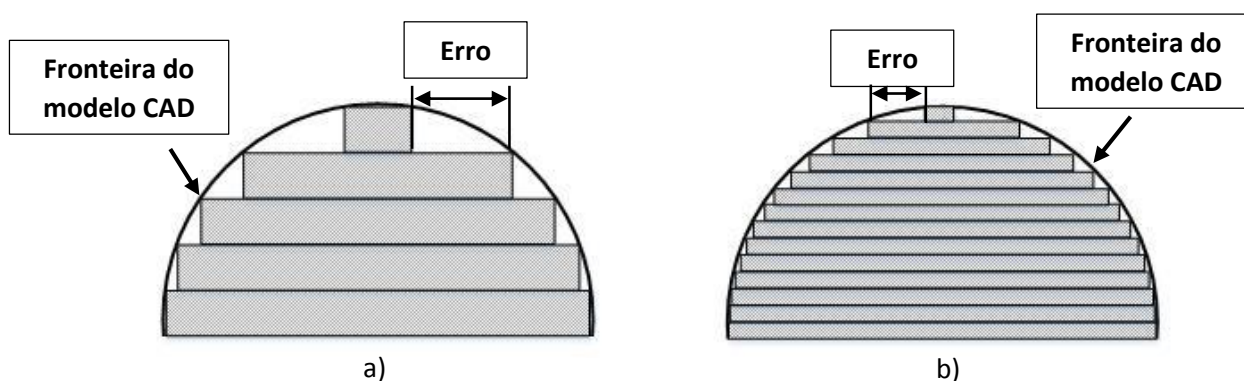


Figura 4.1 - Efeito escada no modelo impresso. a) Efeito escada modelo de baixa resolução. b) Efeito escada modelo de alta resolução.

Outra característica da tecnologia FDM é que não existem superfícies completamente lisas por maior que seja a resolução do modelo, ou seja, mesmo que seja depositado duas camadas iguais uma sobre a outra, a parede formada pela junção das duas não será lisa mas ondulada (Figura 4.2). Isto deve-se ao formato cilíndrico do

filamento extrudido. A ondulação da superfície vai depender não só da geometria do filamento extrudido mas também da temperatura a que ele se encontra e do tempo de arrefecimento. Durante a deposição do filamento, quanto maior for a temperatura de extrusão mais espalmado ficará o material e com isso adquire um formato mais próximo de um retângulo. Se arrefecer muito rápido a tendência é manter o formato cilíndrico original, o que origina superfícies bastante onduladas.

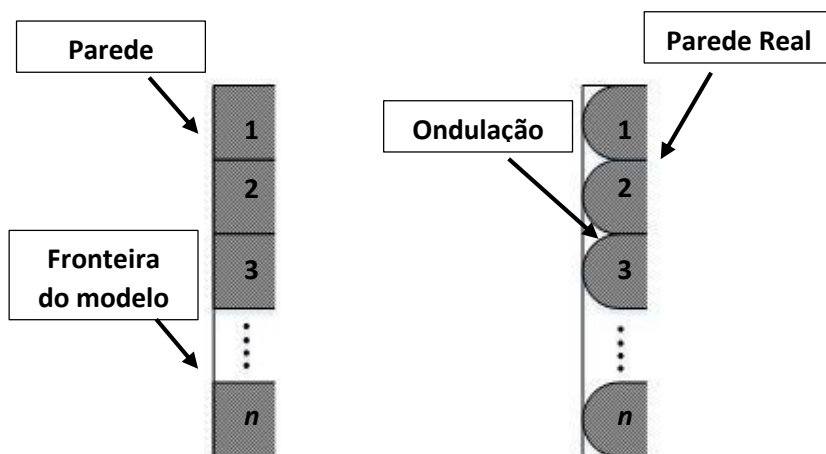


Figura 4.2 - Aspeto superficial das paredes dos modelos impressos.

4.1.2 – Resistência mecânica do modelo

A medição da resistência mecânica de um modelo impresso é uma das formas de determinar se este foi corretamente impresso ou não. A resistência da peça impressa é muito importante para os utilizadores que pretendem obter modelos impressos funcionais.

A resistência com que os filamentos extrudidos estão ligados entre si vai depender da área em contacto entre eles, da temperatura de extrusão e do sistema de arrefecimento. Devido ao formato cilíndrico do filamento extrudido, a área de contacto com a plataforma ou com outros filamentos é bastante reduzida. No entanto devido ao estado físico do filamento extrudido, permite aumentar significativamente a área de contacto, pois o material irá dilatar assim que for depositado. Isto é possível se o sistema de arrefecimento estiver devidamente ajustado. Se o filamento extrudido arrefecer muito rápido, o filamento vai manter a sua geometria original. No limite, se o

arrefecimento for em demasia o filamento simplesmente não vai aderir a qualquer superfície. Neste caso a aderência do material não depende da área em contacto mas da forma como o do sistema de arrefecimento é dimensionado.

A má aderência entre os filamentos vai originar um modelo de fraca qualidade de baixa resistência mecânica. Os modelos de baixa resistência estrutural apresentam zonas muito frágeis e sensíveis, que partem facilmente sempre que lhe é aplicada uma força mesmo de baixa intensidade.

4.2 – Tempo de impressão

Uma das maiores desvantagens da impressão 3D FDM é o tempo que a impressora demora a imprimir um modelo. O tempo de impressão vai depender da estrutura da impressora, da resolução do modelo, da complexidade do modelo, e do cálculo das trajetórias gerado pelo programa de corte. Objetos de grandes dimensões ou de elevada complexidade podem levar várias horas ou até mesmo dias de impressão.

4.2.1 – Limitação da estrutura mecânica

A maioria das impressoras conseguem atingir velocidades elevadas de impressão, no entanto, a velocidade máxima vai ser sempre limitada pela qualidade de impressão. Não interessa o quão rápido é a impressora se esta não conseguir manter uma qualidade de impressão aceitável. Esta limitação vai depender da estrutura da impressora, que tem de suportar as mudanças de direção do extrusor e o *stress* causado pelos componentes em movimento. Quanto maior for a velocidade, maior é a inércia criada pelos componentes em movimento, logo, maior é a vibração da máquina. Isto vai introduzir defeitos nos modelos impressos.

Na realidade, quanto maior for a qualidade exigida menor é a velocidade de impressão. Atualmente uma impressora de baixo custo consegue atingir facilmente velocidades de impressão até 100mm/s sem comprometer a qualidade de impressão.

4.2.2 – Limitação da resolução das camadas e a complexidade

Quanto maior a resolução do modelo impresso, maior será o numero de camadas impressas e consequentemente maior o tempo de impressão. Por exemplo, se escolhermos uma impressão de baixa qualidade com uma resolução de 300 μ m e uma de alta qualidade de 100 μ m por camada, sabemos que o modelo impresso na resolução mais alta durará pelo menos três vezes mais a ser impresso do que o modelo de baixa resolução. Apesar da razão entre as duas gamas de resolução ser de 1:3 não significa que o tempo de impressão seja exatamente três vezes maior, na verdade o tempo de impressão pode ser ainda superior pois para impressões de alta resolução a velocidade de impressão será menor.

A complexidade do modelo é determinada pelo número de contornos calculado pelo programa de corte. O número de contornos também vai determinar o número de travessias geradas, ou seja, o número de travessias será igual ou superior ao número de contornos por camada. Isto pode ser justificado pela análise à Figura 4.3 que mostra a primeira camada de um modelo. Nessa camada podemos ver a preto dois círculos, cada um deles representa um contorno, e dois pontos a vermelho e azul. Cada um desses pontos indica o início de uma travessia, ou seja, é nesse ponto que se inicia uma travessia de um contorno para o outro. Quanto maior for a distancia da travessia, maior é o tempo que demora a faze-la, consequentemente maior o tempo de impressão. A forma como as travessias são escolhidas é determinado pelo programa de corte, se este possuir um algoritmo inteligente vai optar sempre por travessias mais curtas de maneira a diminuir o tempo de impressão.

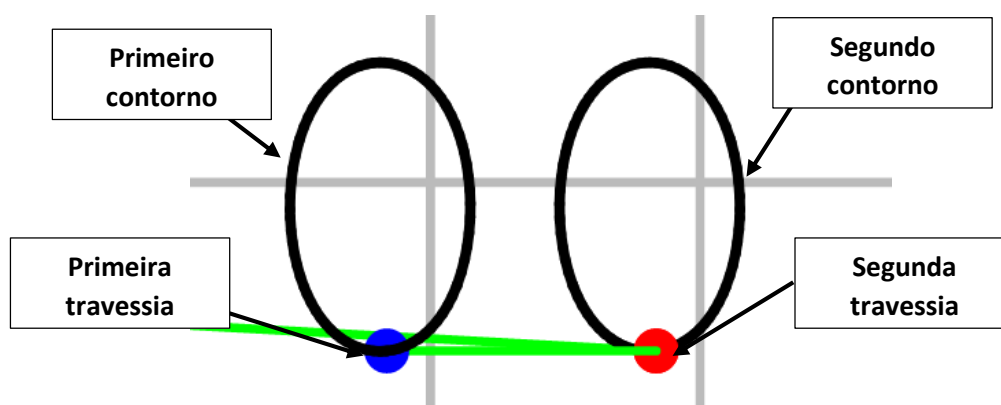


Figura 4.3 - Primeira camada do modelo e respectivos contornos e travessias.

4.2.3 – Limitação do Cálculo das trajetórias

O número de passagens por contorno é determinado por um conjunto de parâmetros programáveis pelo utilizador. Por exemplo, para obter uma impressão com uma parede de 1mm espessura com um filamento extrudido de 0.5mm de diâmetro, o extrusor vai ter que percorrer cada contorno do modelo pelo menos duas vezes para que a espessura da parede seja a indicada. O número de passagens por contorno vai determinar em grande parte o tempo total de impressão. Quanto maior for o número de passagens necessárias para imprimir um determinado modelo, maior será o tempo de impressão.

Além disso para uma impressão com qualidade e resistência mecânica aceitável, cada contorno do modelo necessita pelo menos de duas passagens. As múltiplas passagens servem para aumentar a resistência da parede do modelo e melhorar a qualidade da impressão. Quando maior o número de passagens, maior a resistência da peça, melhor é o acabamento mas por outro lado maior é o tempo de impressão.

O sistema de extrusão desenvolvido neste projeto vai permitir reduzir o número de passagens por contorno para uma única passagem, e com isso diminuir drasticamente o tempo total de impressão. Além disso permite aumentar a resistência mecânica do modelo impresso.

4.3 – Idealização do extrusor ajustável

O dispositivo apresentado nesta secção tem como principal função a redução do tempo total da impressão sem comprometer a qualidade do modelo impresso. Este dispositivo, designado por extrusor ajustável, deposita um filamento retangular (Figura 4.4 a)) invés do tradicional filamento circular (Figura 4.4 b)). A geometria do filamento permite cobrir maior área de impressão, e consequentemente diminuir o tempo de impressão. No extrusor ajustável, o filamento extrudido é duas vezes maior em largura do que um filamento extrudido por um extrusor convencional. Isto permite reduzir o número de passagens por contorno para uma única passagem. A forma como a passagem é calculada é decidida pelo programa de corte desenvolvido e apresentado no próximo capítulo.

Além da diminuição do tempo de impressão, a deposição de um filamento com perfil retangular permite obter modelos impressos com paredes mais lisas, e de maior resistência. Em oposição, para modelos com geometrias particulares, como por exemplo colunas de pequeno diâmetro, a deposição de um filamento retangular pode ser particularmente difícil de se obter. Uma vez que o extrusor deposita um perfil retangular com um tamanho constante, é extremamente complicado obter impressões para contornos com tamanhos inferiores a espessura do filamento extrudido. No entanto, é possível imprimir contornos de espessura inferior ao filamento extrudido se for utilizado o controlo de fluxo de material variável. Utilizando esta técnica é possível variar as dimensões do filamento extrudido para o mesmo bico, ou seja, variando a taxa de fluxo do material que esta a ser extrudido é possível variar o comprimento e a largura do filamento. Esta técnica não vai ser implementada pelo programa de corte desenvolvido neste projeto, uma vez que é destinada a situações muito específicas.

O processo de estudo e desenvolvimento do extrusor ajustável foi em parte baseado em extrusores convencionais. Através de uma análise detalhada de extrusores existentes no mercado e de novas topologias, foi possível desenvolver um sistema de extrusão fiável, robusto, leve e bastante compacto.

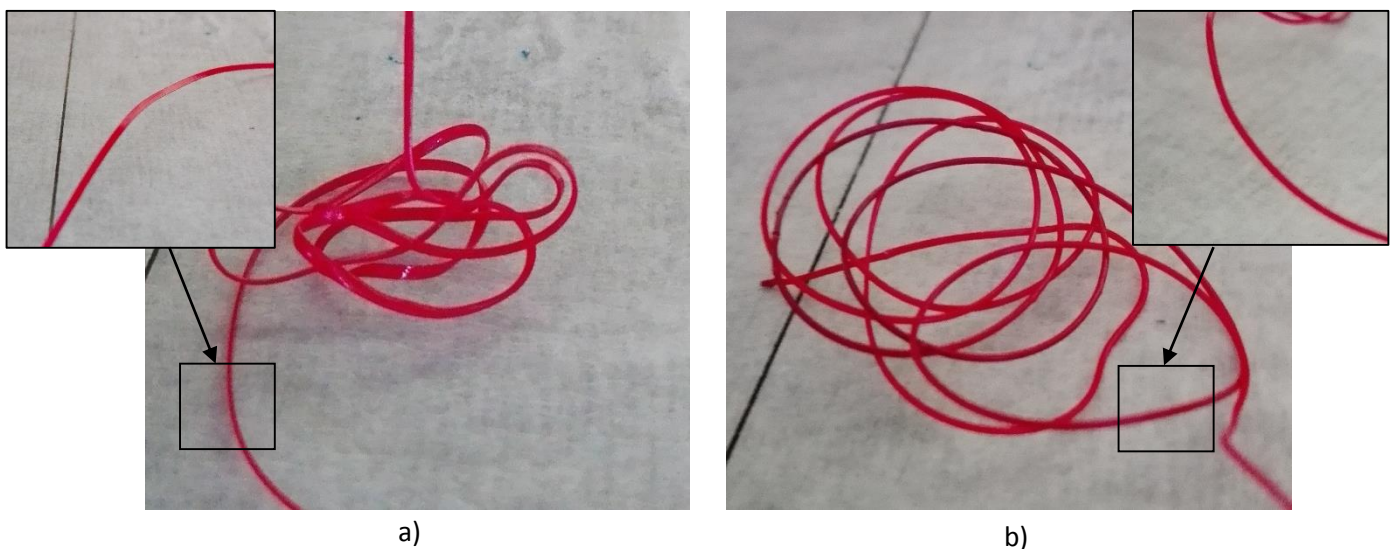


Figura 4.4 - Filamentos extruídos por um sistema de extrusão ajustável (esquerda) e pelo extrusor tradicional (direita). a) Filamento retangular. b) Filamento circular.

4.3.1 – Deposição de um perfil retangular

Além da redução do tempo de impressão, o sistema de extrusão ajustável é projetado de forma a garantir a máxima aderência entre camadas e a qualidade dos modelos impressos.

A aderência entre camadas vai depender de três parâmetros, a temperatura de extrusão, o tempo de arrefecimento e da área em contacto entre filamentos. Se considerarmos que a temperatura de extrusão e o tempo de arrefecimento são devidamente controlados, a superfície de contacto entre os filamentos vai determinar a resistência final do modelo impresso. Nas impressões tradicionais, a superfície de contacto dos filamentos circulares extrudido é bastante baixa. A utilização de filamento retangular vai permitir aumentar a área de contacto entre os filamentos, uma vez que toda a superfície do filamento extrudido estará em contacto com outro filamento (Figura 4.5).

Devido à geometria do filamento extrudido, as paredes do modelo impresso passam também a ser mais lisas e perfeitas. Esta particularidade é mais visível para impressões de baixa resolução. Além disso o filamento retangular permite obter cantos muito mais definidos do que o filamento convencional.

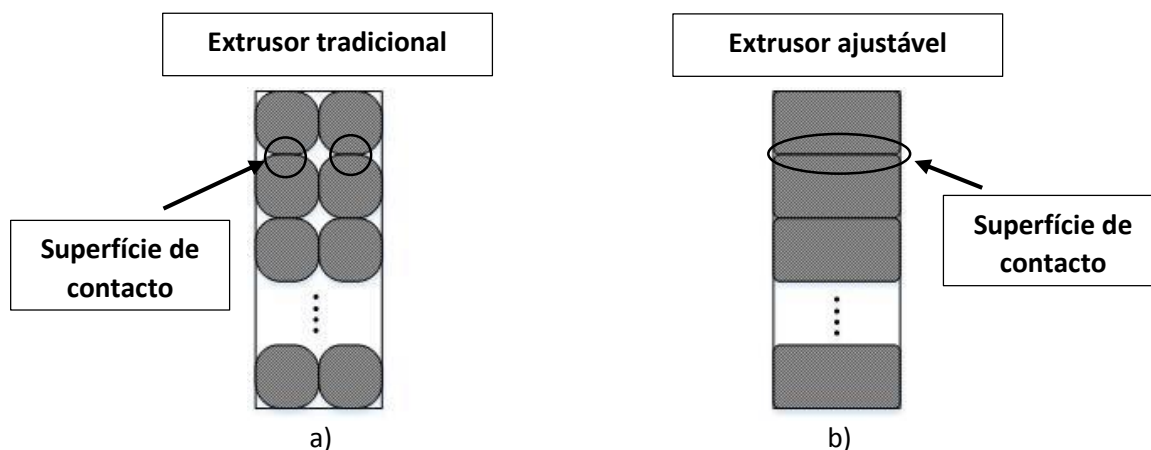


Figura 4.5 - Superfície de contacto entre os filamentos. a) Superfície de contacto no extrusor tradicional. b) Superfície de contacto do extrusor ajustável.

Devido à geometria do filamento extrudido é necessário controlar constantemente a sua orientação para que uma das faces laterais fique sempre paralela ao contorno do modelo impresso.

4.3.2 – Idealização geral da metodologia proposta

Para desenvolvimento do extrusor ajustável foi necessário idealizar e implementar quatro sistemas diferentes. Estes são responsáveis pela tração do filamento, pelo aquecimento, pela orientação do bico e pelo arrefecimento.

Em primeiro lugar o extrusor ajustável tem de ser capaz de fazer a tração de um filamento termoplástico de 1.75mm de diâmetro para de uma gama de velocidades compreendidas entre 5mm/s e os 20mm/s. Esta funcionalidade vai ser assegurada pelo mecanismo de tração. Além disso o sistema deve ser desenvolvido de maneira a não danificar o filamento tracionado.

Sistema de Tração

O sistema de tração (Figura 4.6) é constituído por um motor de passo com uma cremalheira para garantir a máxima tração do filamento. É também utilizado um mecanismo de aperto que exerce uma força até 9 Kg entre o filamento e a cremalheira de maneira a manter o filamento no sítio correto. Nesta primeira versão do extrusor ajustável apenas vão ser utilizados materiais à base de PLA.

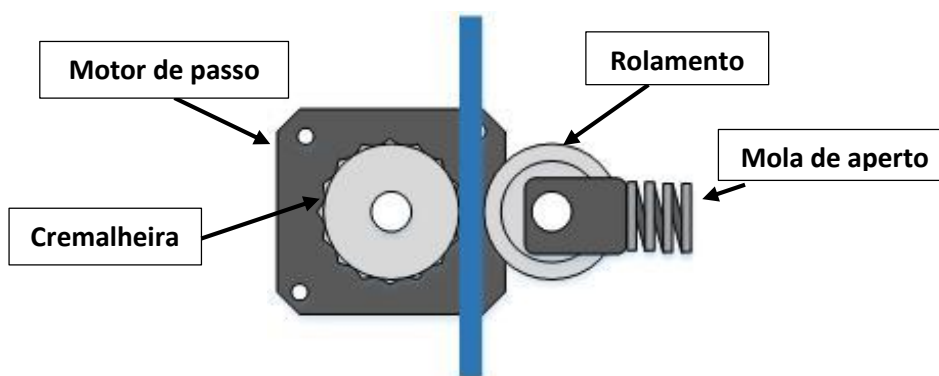


Figura 4.6 - Idealização do sistema de tração.

Sistema de Aquecimento

É também desenvolvido um sistema de aquecimento (Figura 4.7) com a finalidade em aquecer o filamento a uma temperatura correta estabelecida pelo utilizador. Para isso é projetado e desenvolvido um canal quente que é responsável por conduzir o filamento para uma camara que é aquecida pelo bloco de aquecimento. O canal quente é constituído por um tubo de metal que conduz o filamento e pelo bico de extrusão. O bloco de aquecimento é responsável por aquecer a camara quente a uma temperatura específica. É utilizado uma resistência elétrica com elemento aquecedor e um sensor para o controlo da temperatura.

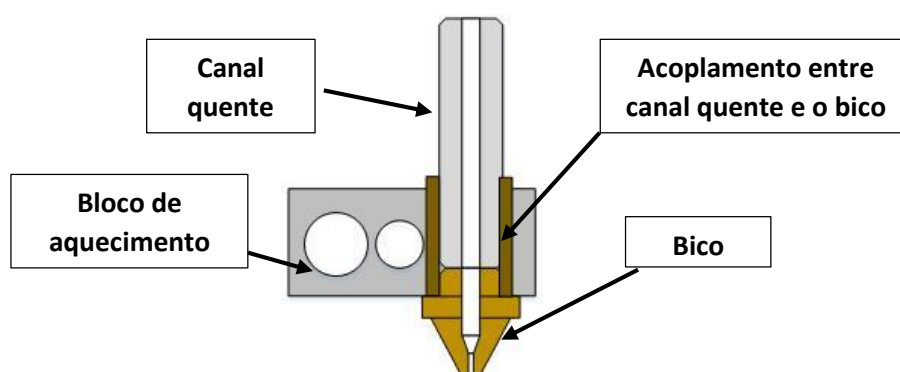


Figura 4.7 - Idealização do sistema de aquecimento.

Sistema de Arrefecimento

O sistema de arrefecimento (Figura 4.8) pode ser dividido em dois mecanismos diferentes. O primeiro mecanismo é utilizado para arrefecer o sistema de tração e impedir que o filamento entre em estado de fusão antes que seja extrudido. É utilizado uma ventoinha, por cima do sistema de tração para garantir que este não sobreaqueça. O sobreaquecimento pode não só danificar o aparelho mas também danificar o filamento impedindo que o mesmo seja extrudido. O segundo mecanismo é utilizado para arrefecer o filamento extrudido. Tal como foi referido nas secções anteriores, é fundamental arrefecer o filamento extrudido de modo a garantir a qualidade desejada nos modelos impressos.

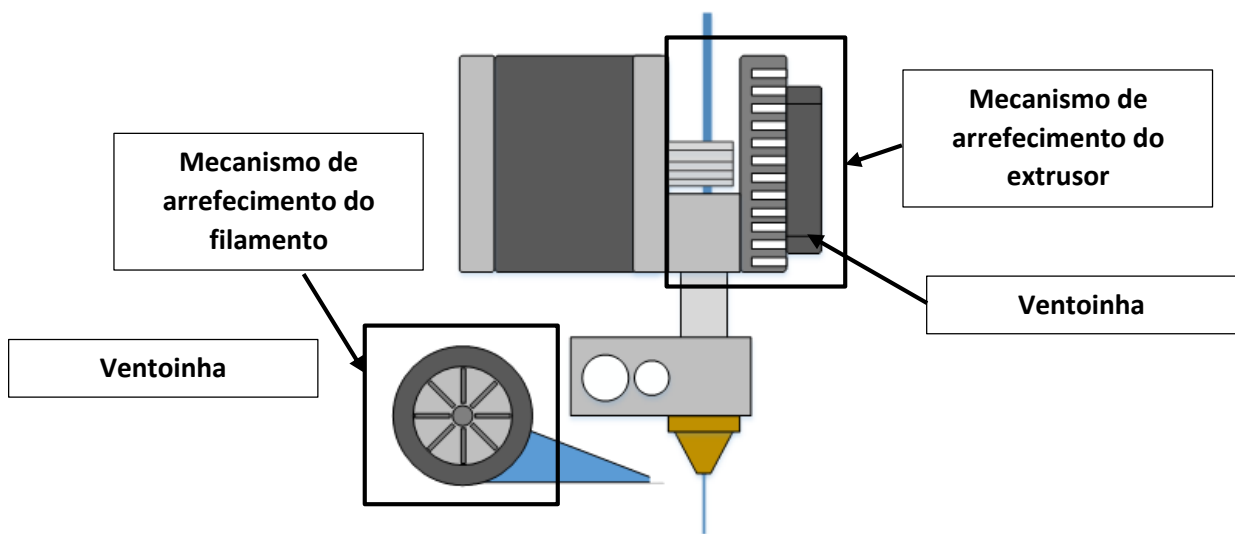


Figura 4. 8 - Idealização do Sistema de arrefecimento

Sistema de Orientação

Para a orientação do filamento é utilizado um sistema de rotação com a função em orientar o bico para uma posição desejada. É utilizado um motor de passo *NEMA14* com uma engrenagem que atua numa segunda engrenagem acoplada ao canal quente. A razão de transmissão das engrenagens utilizadas é de 2:1. Para que exista uma rotação completa por parte do canal quente o motor necessita fazer duas rotações completas. Este sistema permitiu obter mais precisão no posicionamento do bico e reduzir para metade a força exigida ao motor de passo (Figura 4.9).

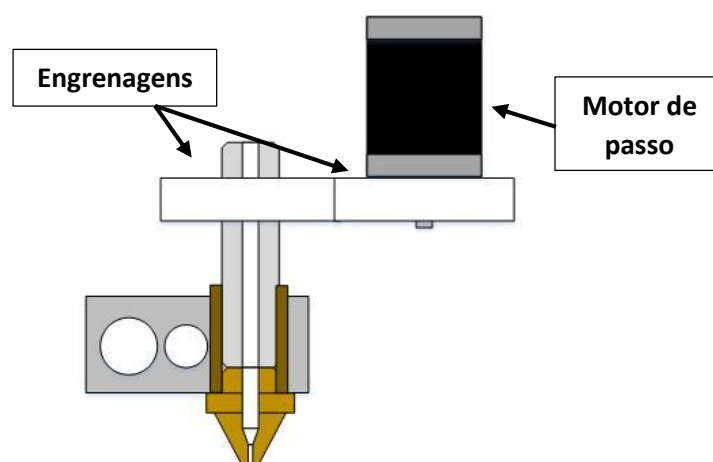


Figura 4.9 - Sistema de orientação do bico.

4.4 – Protótipo do extrusor ajustável

Para a estrutura do extrusor ajustável foi utilizado plástico acrílico devido a sua resistência e baixo custo. Este tipo de plástico é bastante robusto, fácil de trabalhar e resistente a temperaturas elevadas.

Para a construção do canal quente foi utilizado aço inoxidável. A sua utilização permite obter um canal quente bastante resistente e de boa condutividade térmica.

Para a construção dos restantes componentes do extrusor foi utilizado alumínio, por tratar-se de um material leve, muito fácil de trabalhar e com boa condutividade térmica. Este tipo de metal foi utilizado para a construção do bloco quente e a cremalheira.

A Figura 4.10 mostra o protótipo final do sistema de extrusão ajustável. Este é constituído pelos sistemas descritos nas secções anteriores.

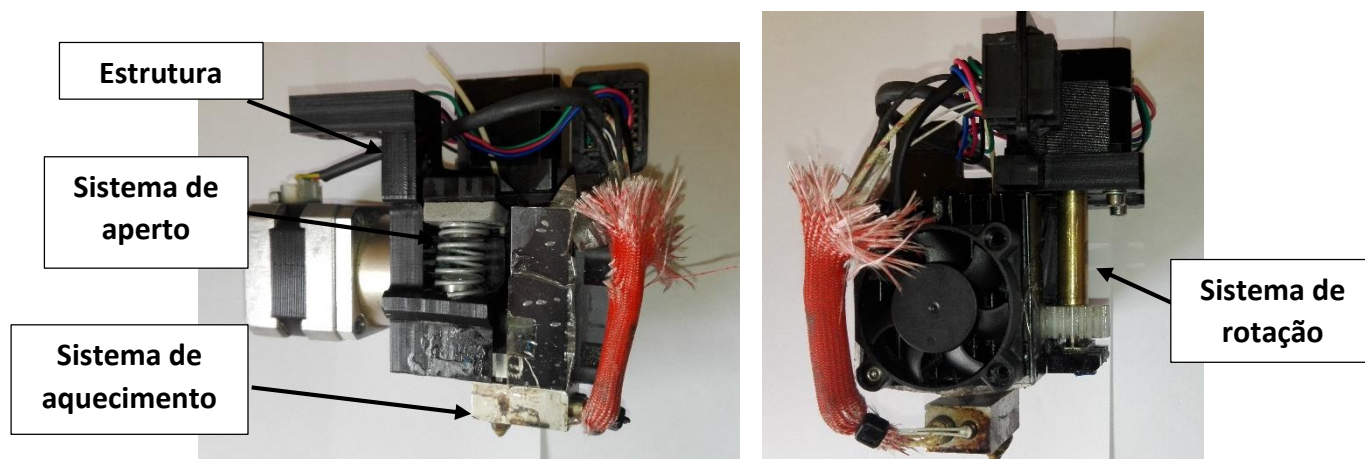


Figura 4.10 - Protótipo final do extrusor ajustável.

4.4.1 – Bico de extrusão

O bico utilizado no sistema de extrusão ajustável é um dos componentes mais importantes. Este é responsável por moldar o filamento extrudido. O bico desenvolvido foi baseado em outros utilizados por sistemas de extrusão já existentes, mas foi especialmente desenhado para o sistema de extrusão ajustável.

As dimensões do bico foram baseadas em estudos e testes realizados a dois bicos de medidas diferentes fabricados numa liga metálica de cobre e zinco. O uso desta liga metálica, tradicionalmente chama por latão, confere ao bico boa condutividade térmica e resistência à oxidação.

Para o primeiro estudo, foi utilizado um bico com um comprimento de 15mm e 10 mm de largura. O furo retangular possui 1 mm de comprimento e 0.4 mm de largura. A maioria das impressões obtidas com este bico apresentaram fraco acabamento superficial e baixa resistência mecânica.

No segundo estudo, foi utilizado um bico de dimensões inferiores ao anterior. Este possui um comprimento de 10 mm e de 12 mm de largura. O furo retangular possui um 0.8 mm comprimento e 0.2 mm de largura. Os resultados obtidos pela utilização desse bico foram bastante satisfatórios. Foram obtidas impressões com bom acabamento superficial e de alta resistência mecânica.

Com base nos resultados obtidos nos testes realizados, foi decidido a utilização do bico de dimensões menores uma vez que é o que apresenta os melhores resultados de impressão (ver Figura 4.11). O bico foi contruído por um torno mecânico de alta precisão. Por outro lado, conceber o furo do bico foi uma tarefa um pouco mais complexa. Devido a sua geometria, realizar este tipo de tarefa utilizando métodos convencionais de furação seria praticamente impossível, para isso foi necessário recorrer a máquinas de erosão.

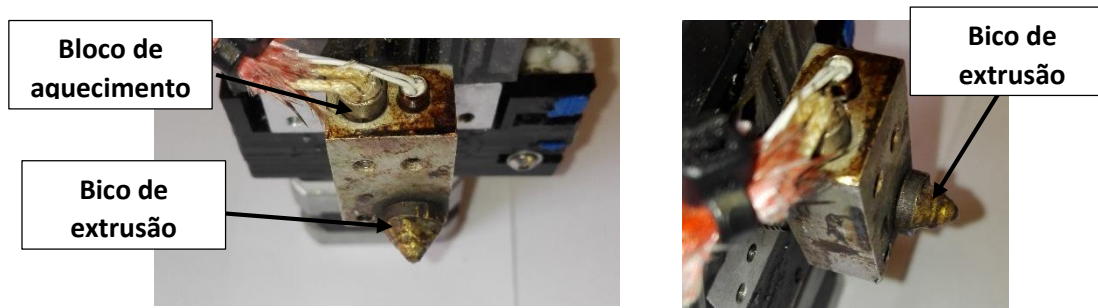


Figura 4.11 - Bico de extrusão utilizado no extrusor ajustável.

4.4.2 – Sistema de Tração

O sistema de tração é responsável por garantir a alimentação do filamento ao sistema de extrusão. Este é dividido em dois mecanismos diferentes, o mecanismo de tração e o mecanismo de aperto.

O mecanismo de tração é utilizado para fazer a tração e retração do filamento. Para a tração é utilizado um motor de passo *NEMA17* com uma resolução de 200 passos por volta completa e uma caixa de redução de 5:1, que lhe confere torque e precisão necessária para a tarefa que executa. Um segundo componente chamado de

cremalheira é diretamente acoplada ao veio do motor. Esta tem como principal funcionalidade, aumentar o atrito com o filamento. A cremalheira é constituída por um conjunto de dentes que ajudam a aumentar a área superficial da mesma.

O mecanismo de aperto tem como principal função exercer uma força entre o filamento e a cremalheira. Quando maior for a força exercida melhor é o contacto entre filamento e o componente de tração. O mecanismo de aperto é constituído por uma mola, uma alavanca e um rolamento. O conjunto formado pela mola e o braço permite exercer uma força de 9Kg entre o filamento e a cremalheira. A força exercida é suficiente para manter o filamento sempre na posição correta. Se a força exercida for mal dimensionada o filamento pode ser danificado. O rolamento utilizado no mecanismo de aperto serve para exercer a força ao filamento sem o danificar durante o processo de tração. Se o ponto de exerceção de força fosse estático e não rotativo, durante a tração o filamento ficaria danificado.

Na tabela 4.1 encontra-se discriminado respetivamente os materiais utilizados para a construção do mecanismo de tração e de aperto, cuja enumeração dos elementos se pode observar na Figura 4.12.

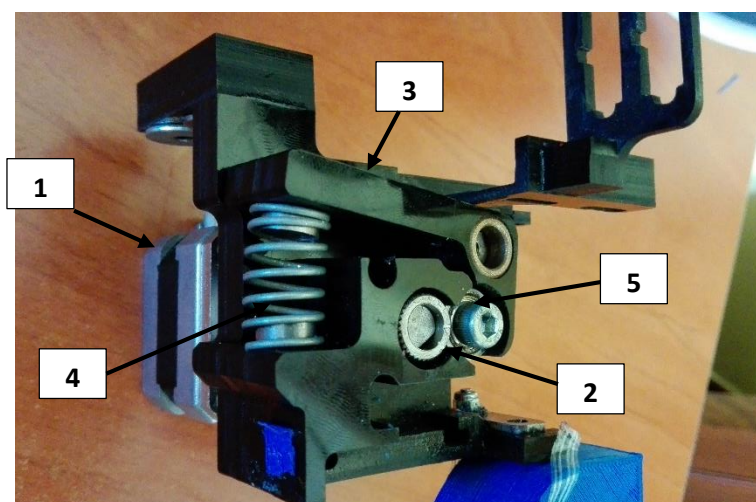







Figura 4.12 - Sistema de tração e de aperto do extrusor ajustável.

Tabela 4.1 - Materiais utilizados para a construção do sistema de tração e aperto.

Numeração na Figura 4.12	Figura	Descrição	Quantidade (unidades)
1		Motor de passo Nema17 com caixa de redução de 5:1.	1
2		Cremalheira	1
3		Alavanca	1
4		Mola	1
5		Rolamento com 14 mm de diâmetro	1

4.4.3 – Sistema de Aquecimento

O sistema de aquecimento utilizado no extrusor ajustável é responsável por providenciar o aquecimento do filamento de impressão. Este é constituído por um conjunto de componentes com o propósito de conduzir e aquecer o filamento a uma temperatura estipulada pelo utilizador.

Para a condução do filamento até à câmara de aquecimento é utilizado um tubo em aço inoxidável. O aquecimento da câmara é feito através de um bloco de aquecimento construído em alumínio que contém o elemento aquecedor e o respetivo sensor de temperatura. Para o aquecimento é utilizado uma resistência elétrica de 24V com uma potência de 40W. Para leitura da temperatura é utilizado um sensor termopar (sensor do tipo J com um erro máximo de 1%).

Assim que o filamento entrar no ponto de fusão é extrudido pelo orifício do bico do extrusor. Ao ser extrudido, o filamento vai adquirir a geometria do bico de

extrusão. Uma vez que o furo é retangular o filamento extrudido também vai adquirir uma geometria retangular.

Na tabela 4.2 encontra-se descrito os materiais utilizados para a construção do sistema de aquecimento, cuja enumeração dos elementos se pode observar na Figura 4.13.

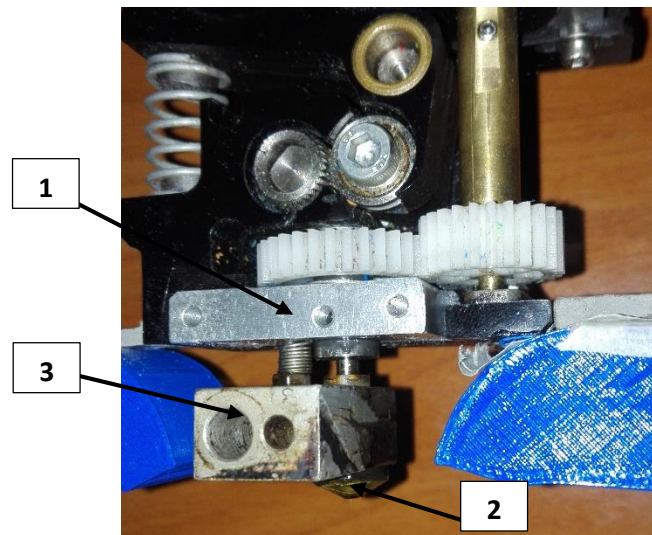





Figura 4.13 - Sistema de aquecimento do extrusor ajustável

Tabela 4.2 - Materiais utilizados para a construção do sistema de aquecimento.

Numeração na Figura 4.13	Figura	Descrição	Quantidade (unidades)
1		Canal quente	1
2		Bico com furo retangular	1
3		Bloco de aquecimento	1

4.4.4 – Sistema de Rotação

O sistema de rotação é um dos mecanismos mais importantes do extrusor ajustável. Este é responsável por orientar a posição do bico do extrusor durante o processo de impressão. O sistema é constituído por um motor de passo *NEMA14* com 200 passos por volta completa, que é responsável por orientar com elevada precisão o bico de extrusão. No veio do motor está acoplado uma engrenagem que transmite movimento a uma segunda engrenagem que esta acoplada ao canal quente do extrusor. O canal quente possui total liberdade de rotação o que permite fazer rotações contínuas. Este está diretamente acoplado ao bico do extrusor, o que significa que quando este rodar para uma determinada posição mesmo vai acontecer com o bico.

O sistema de rotação foi projetado de maneira a ser o mais compacto e leve possível de forma a evitar possíveis defeitos nos modelos impressos devido à massa do extrusor.

Na tabela 4.3 encontra-se descrito os materiais utilizados para a construção do sistema de rotação, cuja enumeração dos elementos se pode observar na Figura 4.14.

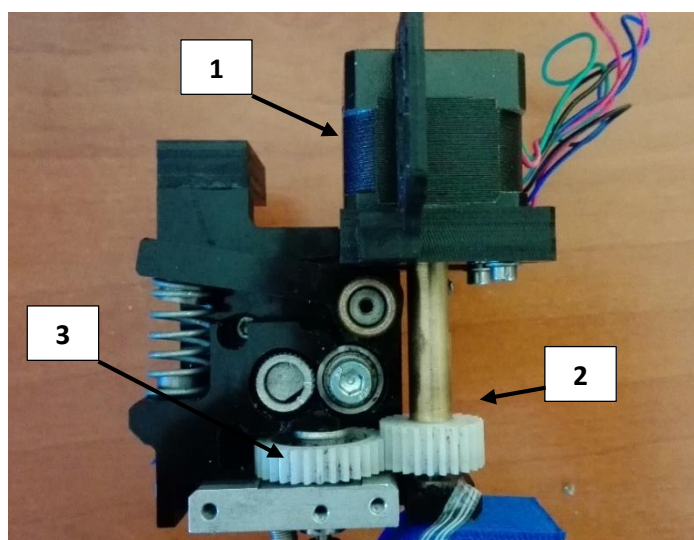





Figura 4.14 - Sistema de rotação do extrusor ajustável.

Tabela 4.3 - Materiais utilizados para a construção do sistema rotativo.

Numeração na Figura 4.14	Figura	Descrição	Quantidade (unidades)
1		Motor de passo <i>Nema14</i>	1
2		Acoplador de motor de passo com engrenagem	1
3		Engrenagem	1

4.4.5 – Sistema de Arrefecimento

O sistema de arrefecimento é dividido em dois mecanismos distintos. O primeiro é responsável pelo arrefecimento do extrusor utilizando ventilação forçada. É utilizado um dissipador de alumínio e uma ventoinha de 24V com 1W de potência). Este mecanismo garante a refrigeração contínua do extrusor.

Na tabela 4.4 encontra-se descrito os materiais utilizados para a construção do primeiro mecanismo de arrefecimento, cuja enumeração dos elementos se pode observar na Figura 4.15.

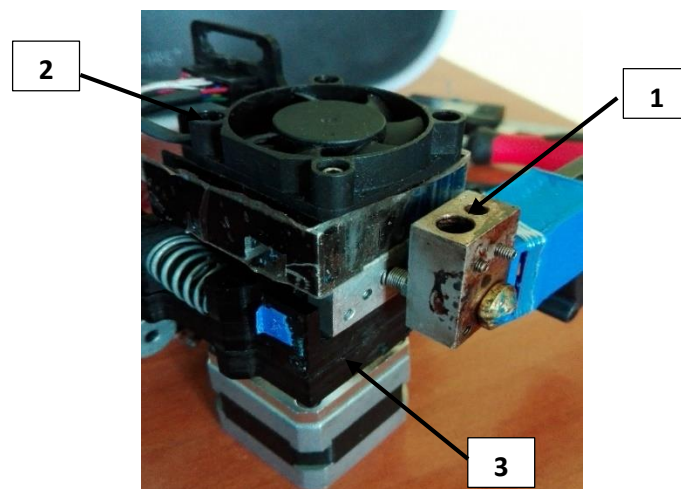


Figura 4.15 - Sistema de arrefecimento do extrusor ajustável.

Tabela 4.4- Materiais utilizados para a construção do sistema de arrefecimento do extrusor.

Numeração na Figura 4.15	Figura	Descrição	Quantidade (unidades)
1		Dissipador de alumínio	1
2		Ventoinha de 24 V	1
3		Bloco de contacto entre o extrusor e o dissipador	1

O segundo mecanismo é utilizado para arrefecer o material extrudido. Este é constituído por um conduta de ar e por uma ventoinha de 12V com 1W de potência. O mecanismo é acoplado à parte lateral do sistema de extrusão. Este é responsável por conduzir o caudal de ar gerado pela ventoinha com a finalidade de arrefecer o material extrudido.

Na tabela 4.5 encontra-se descrito os materiais utilizados para a construção do segundo mecanismo de arrefecimento, cuja enumeração dos elementos se pode observar na Figura 4.16.

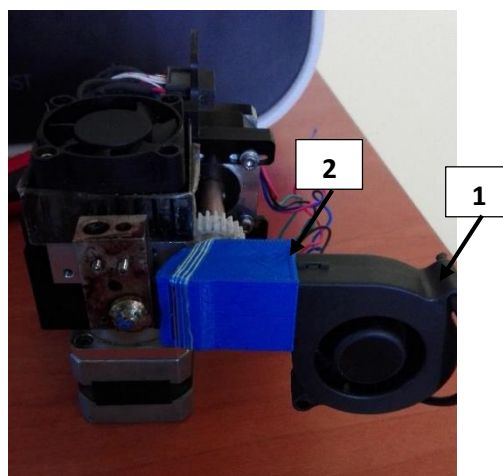




Figura 4.16 - Sistema de arrefecimento do filamento extrudido.

Tabela 4.5 -Materiais utilizados para a construção do sistema de arrefecimento do filamento.

Numeração na Figura 4.16	Figura	Descrição	Quantidade (unidades)
1		Ventoinha de 12 V	1
2		Conduta de ventilação	1

4.4.6 – Eletrónica de controlo do sistema de extrusão

O controlo do extrusor ajustável é feito na totalidade pela placa de controlo *R2C2*. Esta é responsável pelo controlo de temperatura do extrusor, controlo do sistema de tração do filamento e pelo controlo do sistema de orientação do bico do extrusor. O sistema de controlo da temperatura e de tração foram mantidos intactos, enquanto, para o sistema de orientação foi necessário fazer algumas alterações na placa de controlo.

O sistema de controlo de temperatura e de tração do filamento não sofreram qualquer alteração visto que os mesmos são utilizados de forma muito semelhante no sistema de extrusão ajustável. Para o sistema de controlo de orientação foi necessário o uso de mais um controlador de motor de passo.

Foi utilizado um controlador de motor de passo externo da *Texas Instruments* ligado à porta de expansão da placa *R2C2* (Figura 4.17). Além disso o firmware foi atualizado de modo a suportar um novo eixo de rotação.

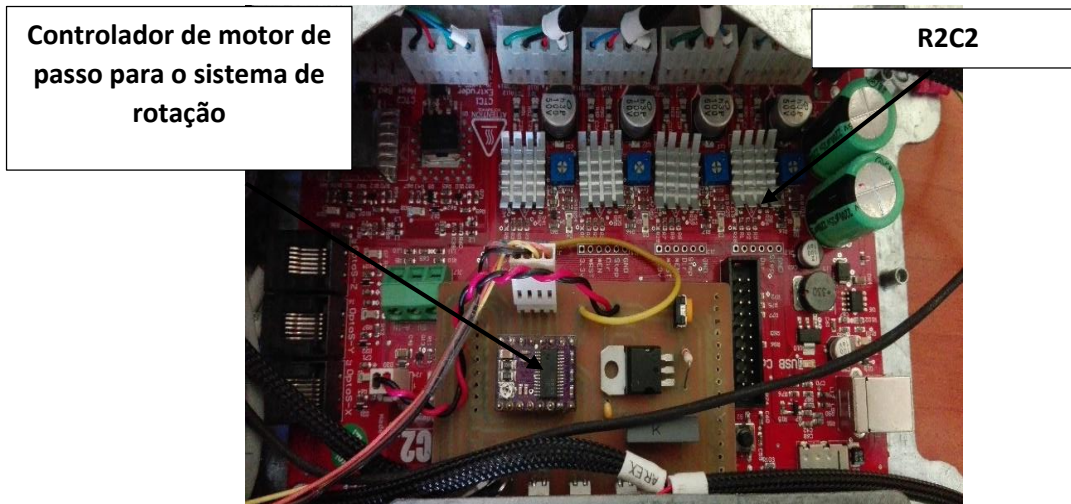


Figura 4.17- Placa de controlo R2C2 e respetivas alterações.

4.4.7 – Integração do extrusor na impressora 3D

O extrusor ajustável é introduzido no mesmo local do extrusor convencional utilizado na impressora *BEETHEFIRST*. O extrusor ajustável foi especialmente desenhado para este tipo de impressora. Com se trata de uma impressora muito compacta, o espaço dedicado ao extrusor é muito limitado. O extrusor ajustável foi desenhado de maneira a ser o mais compacto possível de modo a caber no espaço limitado destinado ao extrusor (Figura 4.18).

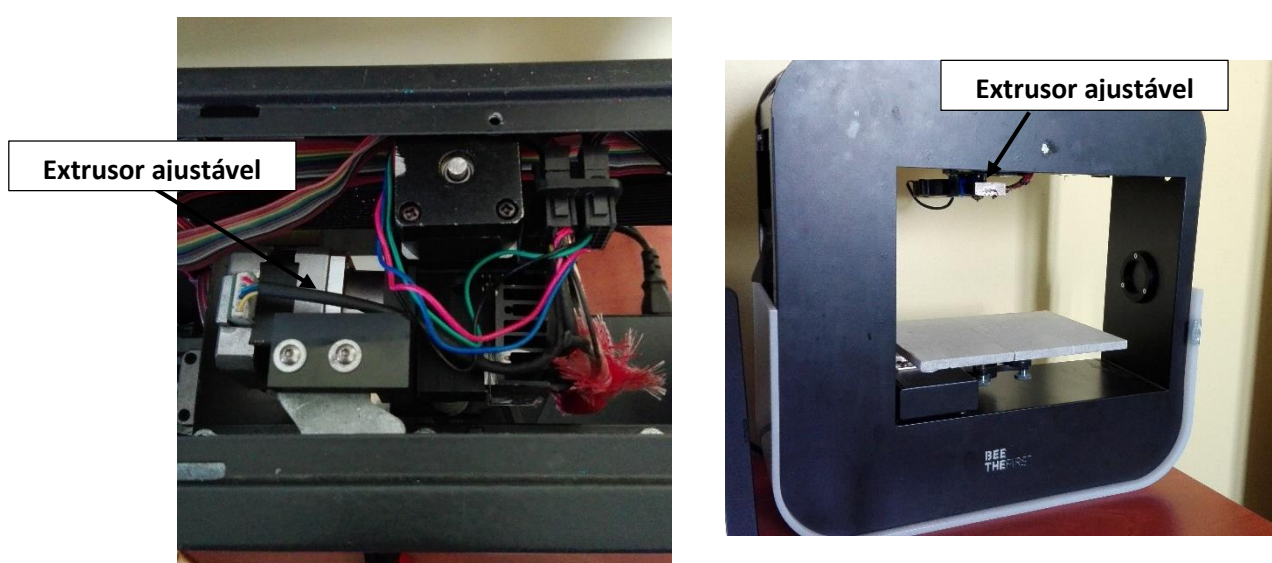


Figura 4.18 - Integração do extrusor ajustável na impressora 3D.

Capítulo 5

5 – Desenvolvimento do Programa de Corte

Este capítulo é destinado à análise e desenvolvimento de um programa de corte de modelos digitais a três dimensões. Este é responsável pela divisão do modelo em camadas transversais que são posteriormente impressas pela impressora 3D. O programa de corte deve ter em conta as características físicas da impressora e da geometria do modelo impresso.

Neste capítulo, é feito inicialmente um levantamento das ferramentas e técnicas utilizadas por um programa de corte profissional. De seguida é demonstrado o estudo e o desenvolvimento de um programa de corte destinado exclusivamente ao extrusor ajustável.

5.1 – Ferramentas e Técnicas

Os objetos impressos por impressoras 3D nascem sempre a partir de modelos de três dimensões desenhados em computador. A forma como são desenhados e projetados no computador pode ser bastante intuitiva, no entanto, para que sejam impressos, por vezes necessitam de estruturas adicionais que ajudam a suportar a própria estrutura do modelo. É possível desenhar qualquer tipo de modelo em computador, mas fatores como a gravidade e o sistema mecânico da impressora, podem limitar o que é possível imprimir. Por exemplo, superfícies planas não podem ser impressas em pleno ar.

Uma comparação entre a impressão 3D e a impressão 2D tradicional em folhas de papel pode ajudar a compreender alguns problemas que ocorrem durante um processo de impressão. Por vezes, na impressão tradicional em folha de papel, deparamo-nos com alguns problemas, tal como impressões não concluídas ou até defeitos na impressão. O mesmo tipo de problemas ocorrem com a impressão 3D mas os efeitos são mais variados e pronunciados. No entanto, existe um conjunto de técnicas que permitem implementar formas de colmatar os problemas referidos.

Em primeiro lugar para a impressão ser bem-sucedida, a primeira camada de cada modelo necessita de fixar à plataforma de maneira a evitar problemas de impressão. O programa de corte deve ter em conta as particularidades da plataforma de impressão, incluindo o tamanho, se possui mesa aquecida ou não, e qual é o tipo de tratamento superficial aplicado.

Tipicamente, a impressão começa com uma *skirt* (nome dado a um conjunto de camadas impressas para limpeza do bico do extrusor e para detetar problemas). Depois pode ser usado uma técnica chamada *brim* (deposição de material extra à volta dos contactos e entre a plataforma e o modelo impresso) ou *raft* (conjunto de camadas por baixo do modelo impresso) para criar uma base sólida.

Em seguida, é necessário considerar a orientação do modelo impresso. Se o modelo possui partes suspensas no ar é necessário adicionar algum tipo de suporte, ou talvez, orientar o modelo de uma maneira diferente de forma a evitar o material de suporte.

5.1.1 – Início da impressão e técnicas de aderência

Um dos maiores desafios da impressão 3d é garantir a aderência do modelo à plataforma. Por vezes, o modelo possui pouca área de contacto com a plataforma, o que significa que um simples movimento gerado pelo extrusor pode ser o suficiente para descolar o modelo. Quando isto acontece, as camadas seguintes são depositadas aleatoriamente pois não possuem qualquer área de contacto. Como resultado é obtido uma impressão tipicamente chamada de “printing hair”.

Técnica de aderência – Brim

Uma *brim* trata-se de uma camada inicial de maior tamanho e de baixo rigor que faz contacto entre a plataforma e o modelo impresso apenas nos pontos de contacto do modelo com a plataforma (Figura 5.1). Esta camada permite aumentar a aderência entre o modelo e a plataforma.

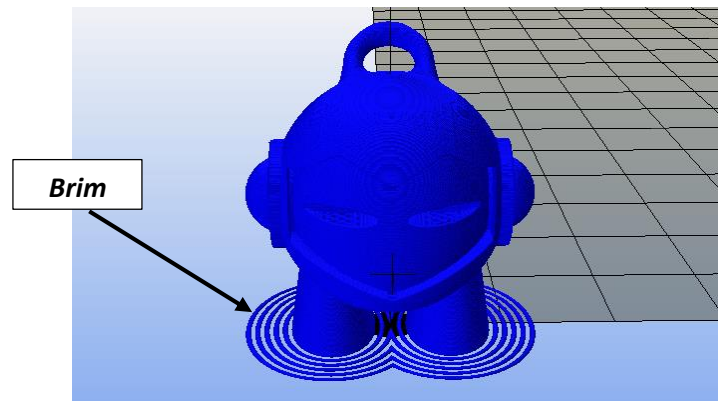


Figura 5.1 - Técnica Brim aplicada a um modelo 3D.

Técnica de aderência – Skirt

A técnica de *skirt* designa um conjunto de voltas de filamento extrudido no início da impressão, que permite mostrar os limites máximos do modelo impresso e ao mesmo verificar se existem problemas de aderência ou de má calibração da plataforma de impressão (Figura 5.2). Esta técnica permite eliminar logo à partida alguns problemas que podem surgir no início de cada impressão. Quando a *skirt* é depositada à volta do modelo e define o área de impressão, esta permite de uma forma rápida verificar se existe ou não algum tipo de problemas com a plataforma ou até com o sistema de extrusão.

Para além disso, se o filamento é diferente da impressão anterior, esta técnica permite remover todo o filamento de cor diferente que resta no extrusor. De uma maneira geral, a *skirt* permite limpeza do extrusor antes de cada impressão.

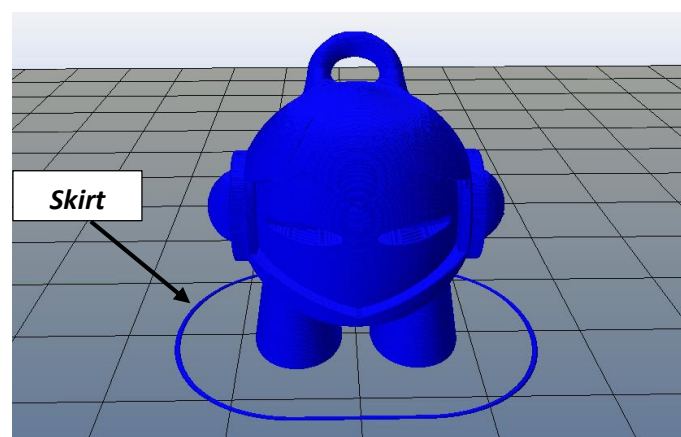


Figura 5.2 - Técnica de Skirt aplicada a um modelo 3D.

Técnica de aderência- Raft

A técnica *raft* é o nome dado a um conjunto de camadas depositadas por baixo do modelo impresso (Figura 5.3). Ao contrário da técnica de *Brim*, esta deposita múltiplas camadas por toda a área limitada pelo tamanho do modelo. Esta técnica permite aumentar a adesão entre a camada inicial e a plataforma de impressão. Além disso o *raft* permite criar uma base sólida sobre a qual serão depositadas as camadas mas também estabilizar o modelo impresso.

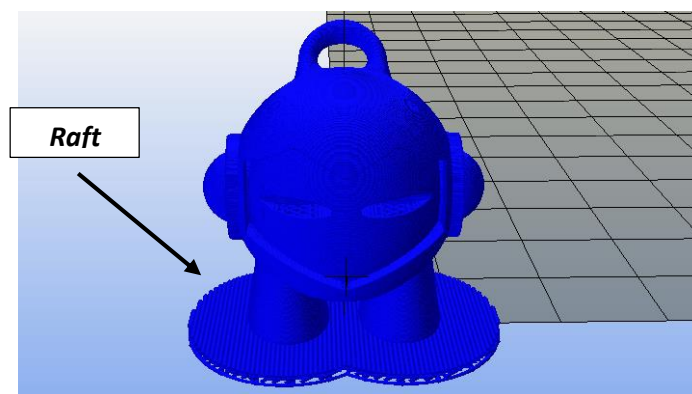


Figura 5.3 - Técnica de *Raft* aplicada a um modelo 3D.

5.1.2 – Estruturas de Suporte e Orientação do Modelo

Durante uma impressão, é muito comum ocorrerem situações em que o extrusor está a depositar o filamento em pleno ar. Isto significa que no local onde o extrusor está a fazer a deposição não existe qualquer área na qual o filamento possa ser depositado. Por exemplo, um modelo de uma estátua com um braço esticado. Assumindo que a estátua está a ser impressa de baixo para cima, as camadas iniciais do braço que são impressas no ar vão cair caso não possuam qualquer tipo de estrutura que preencha esse espaço vazio. Estruturas com este propósito são chamadas de “Estruturas de suporte”. Por vezes este tipo de problemas pode ser eliminado orientando o modelo de uma forma diferente.

Estruturas de suporte

As estruturas de suporte representam um conjunto de colunas ou outras formas de estruturas com o objetivo de preencher lacunas no modelo impresso. Essas

estruturas têm origem na plataforma e crescem até atingirem as zonas de maior fragilidade do modelo.

O suporte é normalmente gerado automaticamente pelo programa de corte ou em outros casos especiais é gerado manualmente pelo utilizador. De uma maneira geral, a utilização de estruturas de suporte é um tipo de técnica a evitar, pois consome muito tempo de impressão e a remoção pode causar danos irreversíveis no modelo impresso. A Figura 5.4 mostra a diferença entre um modelo sem suporte (Figura 5.4 a)) e um com suporte (Figura 5.4 b)).

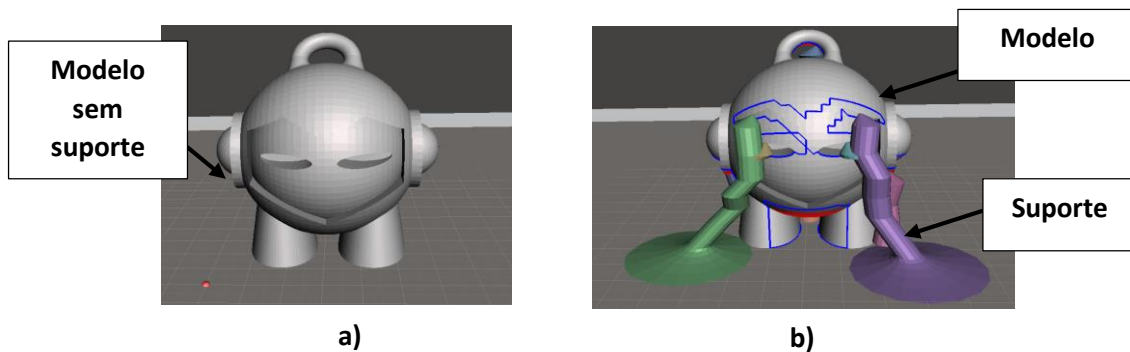


Figura 5.4 – Estrutura de suporte do modelo. a) Modelo sem suporte. b) Modelo com suporte.

Orientação do modelo

Existem alguns modelos no qual é fácil visualizar a face que é “suposto” ser o base da impressão. Porém, orientando o modelo para posições específicas pode aumentar a área em contacto da primeira camada e diminuir a quantidade de estruturas de apoio. A orientação do modelo pode ser bastante vantajosa, quando é necessário imprimir um modelo consecutivamente, pois permite a redução do tempo de impressão e obter impressões de maior qualidade. A Figura 5.5 mostra o ganho em suporte obtido pela orientação do modelo.

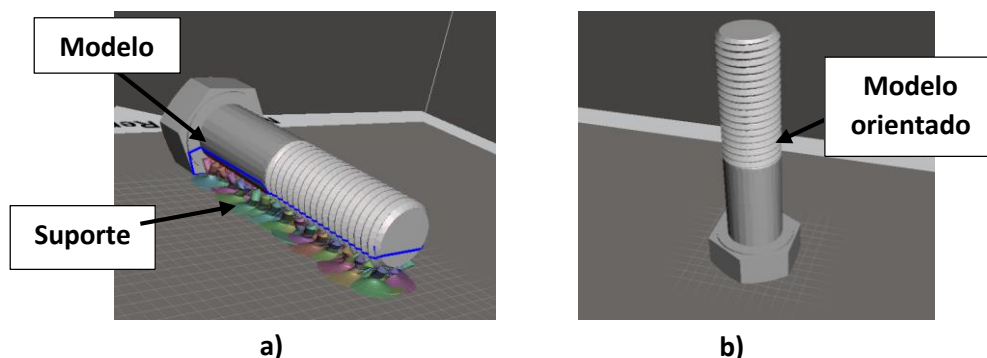


Figura 5.5 - Influência da orientação do modelo. a) Modelo com necessidade de suporte. b) Modelo sem necessidade de suporte.

5.1.2 – Técnicas de Preenchimento

Assim como existe espaço aberto no exterior do modelo (tal como a estatua mencionada na secção anterior), o mesmo surge dentro do modelo ou no espaço fechado pelo modelo. Se tomarmos por exemplo, um caixa fechada, esta necessita de algum tipo de suporte no interior para suportar as camadas que estão entre a base e o topo do modelo. Este tipo de suporte é chamado de *infill*.

Em certos casos, este tipo de suporte não é necessário em todas as partes do modelo, de facto em certas zonas é possível utilizar uma técnica chamada de ponte (Bridging).

Preenchimento do modelo - Infill

Normalmente os utilizadores não costumam fazer impressões com preenchimento total dos modelos, porque consome imenso filamento. No entanto, tipicamente os objetos também não podem ser impressos sem qualquer tipo de preenchimento caso contrário não haveria suporte para as camadas impressas no topo do modelo.

A maioria dos programas de corte permitem criar suportes interno de diferentes padrões, de forma a criar estruturas solidas e minimizar o consumo de filamento. Outro propósito do *infill*, e possivelmente dos mais importantes é a capacidade de suportar o encolher das paredes do modelo. Os padrões criados pelo programa são suficientemente resistentes para criar estruturas capazes de sustentar as paredes do modelo na posição correta. Isto permite que os modelos impressos mantenham a precisão e qualidade de impressão. A Figura 5.6 mostra dois dos padrões mais utilizados para o preenchimento internos dos modelos impressos.

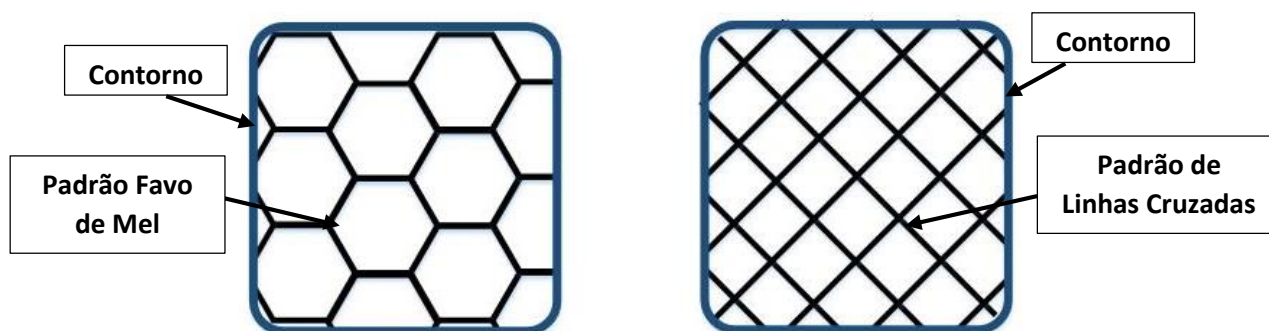


Figura 5.6 - Padrões mais utilizados no preenchimento interno dos modelos.

A quantidade de *infill* (em percentagem), indica a área que deve ser preenchida por cada camada. O padrão de *infill* também pode ser especificado. Entre os padrões mais utilizados encontramos o padrão favo de mel e o de linhas cruzadas que criam estruturas bastante resistentes. A forma como estas técnicas de preenchimento são configuradas vai determinar a resistência do modelo impresso.

Preenchimento em ponte - Bridging

É possível criar pontes entre áreas abertas do modelo sem necessitar o uso de suporte. Existem vários estudos sobre as melhores configurações para colmatar espaços vazios. Existem casos em que a velocidade da impressão é menor e a taxa do fluxo do filamento é maior, consequentemente a ponte criada vai torna-se flácida. Por outro lado, para impressões rápidas e baixa taxa de deposição, o filamento não vai esticar o suficiente e vai quebrar. Encontrar o ponto ótimo requer estudo e algum trabalho experimental.

O programa de corte é responsável por calcular a configuração ideal para cada impressora. Este deve de encontrar a relação ideal entre a taxa de fluxo do material depositado e a velocidade de impressão.

5.2 – Desenvolvimento do programa de corte para o extrusor ajustável

O programa de corte desenvolvido especialmente para este projeto tem como principal funcionalidade a criação de um código G-Code específico para o sistema de extrusão ajustável. O programa implementa um conjunto de funcionalidades base que permitem realizar a conversão de um modelo 3D. Essas funcionalidades permitem gerir o processo sequencial de conversão, desde o corte do modelo até a criação de um ficheiro G-Code. Operações que permitem gerar material de suporte externo e orientar o modelo não serão implementadas nesta fase do projeto, uma vez que existem outros programas, como por exemplo o *Meshmixer*, que permitem gerar todo tipo de estruturas de suporte e exportar esses modelos para um ficheiro STL.

A Figura 5.7 mostra as etapas que permitem converter um modelo 3D num conjunto de instruções G-Code interpretáveis pela impressora 3D. Na primeira etapa é

executado o corte do modelo seguido do *offset* do mesmo. De seguida, é calculado a orientação do filamento para cada um dos contornos gerados. Uma vez concluídas as três primeiras etapas é processada toda a informação e gerado um único ficheiro com instruções G-Code.

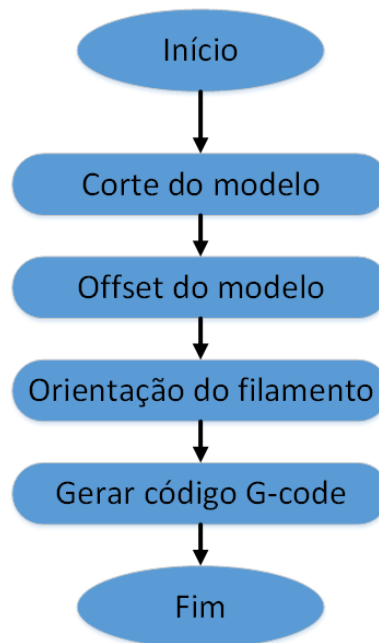


Figura 5.7- Etapas de conversão de um modelo 3D em instruções interpretáveis pela impressora 3D.

O programa de corte é desenvolvido desde raiz utilizando linguagem de programação em JAVA. Trata-se de uma linguagem orientada a objetos, o que a torna uma ferramenta extremamente poderosa. Possui portabilidade, o que significa que o mesmo código pode ser executado em diversas plataformas sem a necessidade de alteração do código.

Nesta secção é descrito com detalhe as etapas e os algoritmos que conferem ao programa de corte a capacidade de conversão de um ficheiro STL gerado por um programa de modelação 3D num conjunto de instruções interpretáveis para uma impressora 3D. O código gerado pelo programa de corte é destinado à impressora *BEETHEFIRST* disponibilizada pela *BEEVERYCREATIVE*, mas também pode ser utilizado para impressoras de outros fabricantes.

5.2.1 – Corte do modelo

A primeira etapa do processo de conversão envolve o corte do modelo 3D em múltiplas camadas transversais. O número de camadas é determinado pela resolução do modelo, quanto maior for a resolução maior será o numero de camadas geradas.

Leitura do ficheiro no formato STL

Para ser possível cortar um modelo 3D em camadas, este deve encontrar-se no formato STL. Este formato, gerado por programas de CAD ou modelação 3D, descreve o modelo por um conjunto de triângulos ligados entre si. Quanto maior for o numero de triângulos gerados pelo programa, maior será a resolução do modelo. O ficheiro STL descreve um modelo 3D por um conjunto de coordenadas X,Y e Z que correspondem aos vértices de cada um dos triângulos. A Figura 5.8 mostra a forma como é representado um dos triângulos no ficheiro STL. Para o processo de corte é fundamental ter acesso a toda informação do ficheiro caso contrário não é possível realizar qualquer tipo de operação de corte.

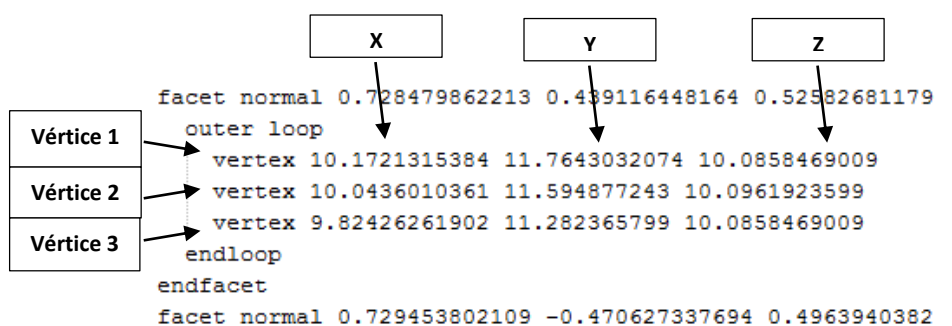


Figura 5.8- Representação de um triângulo no ficheiro STL.

Interseções entre os triângulos e o plano

Para cada um dos triângulos, são gerados três segmentos com início e fim nos vértices do mesmo. Ao interseccionar os três segmentos com um plano cartesiano definido em Z, são obtidos ou não dois pontos diferentes, que ligados entre si representam um dos segmentos do contorno. Os pontos só são obtidos se os segmentos estiverem contidos no plano caso contrário o resultado é nulo. A Figura 5.9 mostra a forma como é feita a interseção entre um triângulo gerado pelo ficheiro STL e um plano cartesiano.

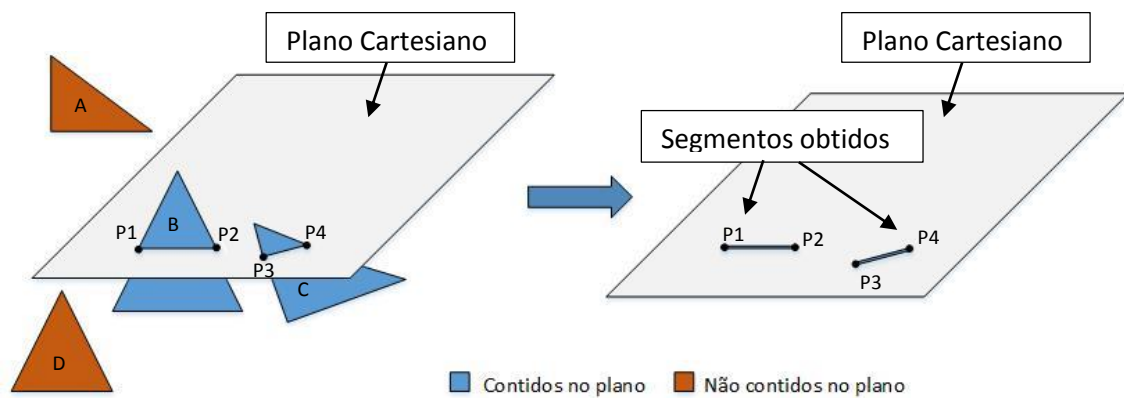


Figura 5.9 – Resultados obtidos pela interseção entre um triângulo e um plano.

Os pontos de interseção são calculados a partir da equação paramétrica da reta (5.1) e a equação geral do plano (5.2).

$$r: \begin{cases} x = x_0 + at \\ y = y_0 + bt \\ z = z_0 + ct \end{cases} \quad (5.1)$$

$$a_px + b_py + c_pz = d_p \quad (5.2)$$

Substituindo na equação geral do plano as variáveis (x) , (y) e (z) pela equação paramétrica da reta (5.3), é possível obter o valor da variável (t) . Uma vez encontrada e substituída na equação paramétrica da reta, é possível determinar os pontos de interseção.

$$a_p(x_0 + at) + b_p(y_0 + bt) + c_p(z_0 + ct) = d_p \quad (5.3)$$

Uma vez calculados todos os pontos de interseção por plano, é chegado a um contorno final. Esse contorno é gerado pela união entre os pontos obtidos nas interseções. É de referir que o processo de corte do modelo é o que consome mais recursos e mais tempo de cálculo.

5.2.2 – *Offset* do modelo

A segunda parte da conversão do modelo envolve um processo chamado de *Offset*. Na verdade o *Offset* é uma ferramenta maioritariamente utilizada nos programas de CAD, que permite fazer uma cópia de um conjunto de entidades selecionadas e copiá-las a uma distância específica da original. Um elemento que sofre um *Offset* será sempre paralelo ou concêntrico ao seu original.

O programa de corte utiliza uma ferramenta de *Offset* para um propósito muito específico. Se simplesmente utilizássemos os contornos do modelo, e depositássemos filamento, por exemplo com 1mm de diâmetro ao longo desse contorno, o modelo impresso ficaria com um excesso de 0.5 mm. Isto acontece, porque não é compensado o diâmetro do filamento extrudido. Para compensação do diâmetro do filamento é utilizada a técnica do *Offset*, que cria um contorno igual ao original mas com as devidas compensações. A Figura 5.10 mostra a diferença entre um contorno com compensação e outro sem compensação.

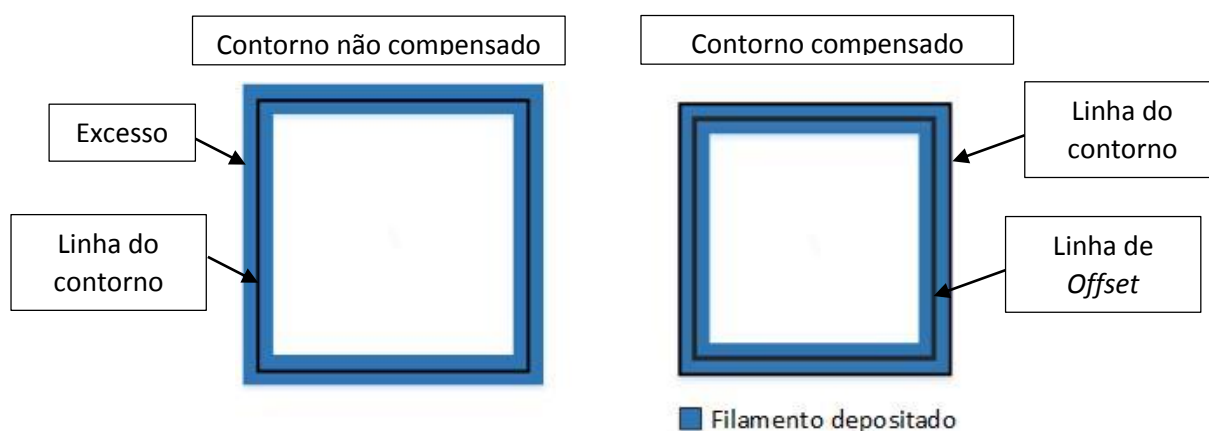


Figura 5.10 - Diferença entre modelo compensado e não compensado.

Calculo do sentido de rotação do contorno

A primeira etapa do cálculo do *offset* permite determinar o sentido de rotação do contorno. O sentido de rotação que pode ser horário ou anti-horário vai determinar em que sentido é feito o *offset*. Para isso é necessário utilizar dois segmentos dos contornos calculados no corte do modelo. Nesta etapa cada segmento deve ser tratado

como um vetor e não como um segmento de reta. A figura 5.11 mostra a forma como é determinado o sentido de rotação do contorno.

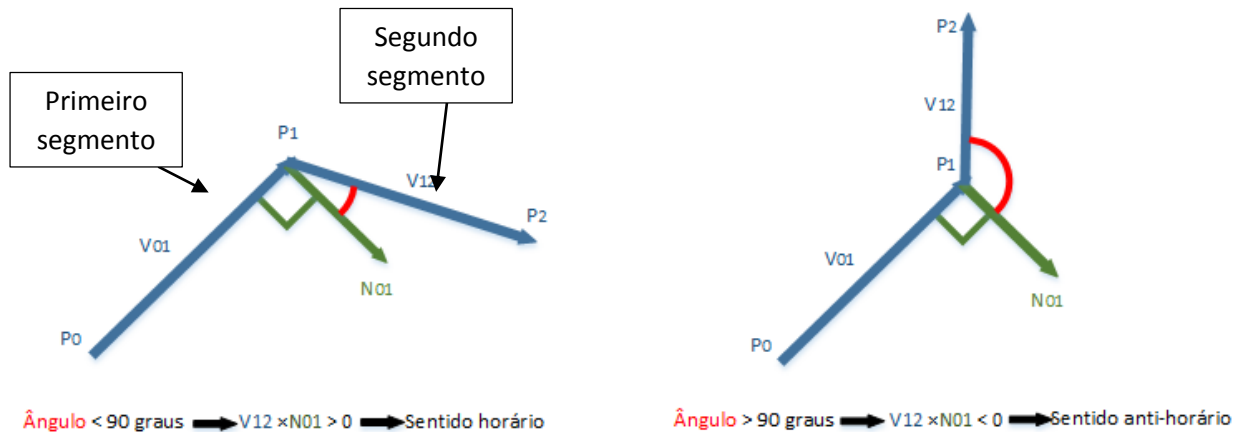


Figura 5.11 - Forma de determinar o sentido de rotação do contorno.

O sentido de rotação é determinado pelo ângulo formado entre (N_{01}) e (V_{12}) e também pelo produto entre (N_{01}) e (V_{12}) . Se o ângulo obtido for inferior a 90° , o produto entre (N_{01}) e (V_{12}) vai ser superior a zero e a rotação dar-se-á no sentido horário. Por outro lado, se o ângulo for superior a 90° , o produto entre (N_{01}) e (V_{12}) vai ser inferior a zero e o sentido de rotação dar-se-á no sentido anti-horário. A implementação do cálculo do sentido de rotação pode ser analisada no seguinte algoritmo.

Algoritmo 1: Implementação do cálculo do sentido de rotação do contorno

Entrada: P_0, P_1, P_2

Início

$V_{01} = (P_{1x} - P_{0x}, P_{1y} - P_{0y})$ // Vetor V_{01}

$V_{12} = (P_{2x} - P_{1x}, P_{2y} - P_{1y})$ // Vetor V_{12}

$N_{01} = (V_{01y}, -V_{01x})$

$d = V_{12x} \times N_{01x} + V_{12y} \times N_{01y}$ // Produto entre N_{01} e V_{12}

Se $d < 0$ **então**

// Sentido horário

$rot = (V_y, -V_x)$

Senão

// Sentido anti-horário

$rot = (-V_y, V_x)$

Fim se

// se $d == 0$ significa que os dois vetores possuem a mesma direção

Fim

Calculo dos segmentos paralelos

A segunda etapa do cálculo do Offset introduz o cálculo dos segmentos paralelos às bordas do contorno. Uma vez encontrado o sentido no qual vai ser feito o Offset, é possível encontrar os pontos paralelos para cada segmento do contorno, exatamente à distância pretendida.

Para cada segmento do contorno é necessário calcular dois pontos de *offset*. Cada um desses pontos será paralelo aos pontos originais que compõem cada segmento do contorno. A Figura 5.12 mostra a linha paralela formada pelo *Offset* de um segmento do contorno.

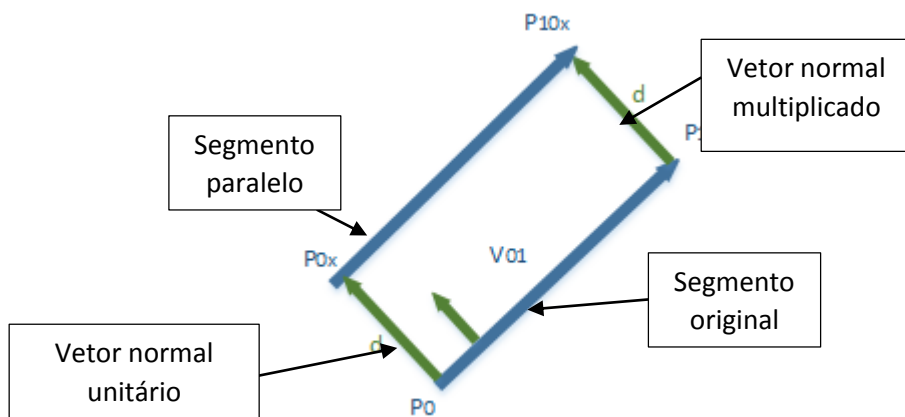


Figura 5.12 - Linha paralela obtida pelo *Offset* de um segmento.

Inicialmente é necessário determinar o vetor normal com um o comprimento de uma unidade. Uma vez calculado, este é multiplicado pela distância desejada para o *Offset*. No passo seguinte é aplicado o vetor normal a cada extremo do vetor original (V_{01}), e assim obter dois pontos paralelos (P_{0x}) e (P_{10x}). Estes permitem definir uma linha paralela ao segmento do contorno.

A implementação do cálculo da linha paralela pode ser vista no seguinte algoritmo.

Algoritmo 2: Implementação do cálculo dos pontos paralelos	
Entrada: P_0, P_1, rot	
Início	
$V_{01} = (P_{1x} - P_{0x}, P_{1y} - P_{0y})$	// Vetor V_{01}
$len = \sqrt{rot(V_{01x})^2 + rot(V_{01y})^2}$	// Comprimento do vetor
$d_u = (\frac{rot(V_{01x})}{len}, \frac{rot(V_{01y})}{len})$	// Norma unitária
$d_{01} = (d_{ux} \times distancia, d_{uy} \times distancia)$	// Norma multiplicada
$P_{x0} = (P_{0x} + d_{01x}, P_{0y} + d_{01y})$	// Primeiro ponto calculado
$P_{x10} = (P_{1x} + d_{01x}, P_{1y} + d_{01y})$	// segundo ponto calculado
Fim	

Cálculo das interseções entre os segmentos paralelos

A terceira e última parte do cálculo do *Offset* permite determinar a interseção entre as retas paralelas geradas para cada contorno. A interseção entre os segmentos formados pelos pontos (P_{0x}) , (P_{10x}) , (P_{12}) e (P_{2x}) , dão origem um único ponto de interseção (P_{1x}) . A Figura 5.13 mostra a interseção de duas retas calculas pelo *Offset* dos segmentos de um contorno. A interseção entre as duas retas é calculado pelo algoritmo 4.

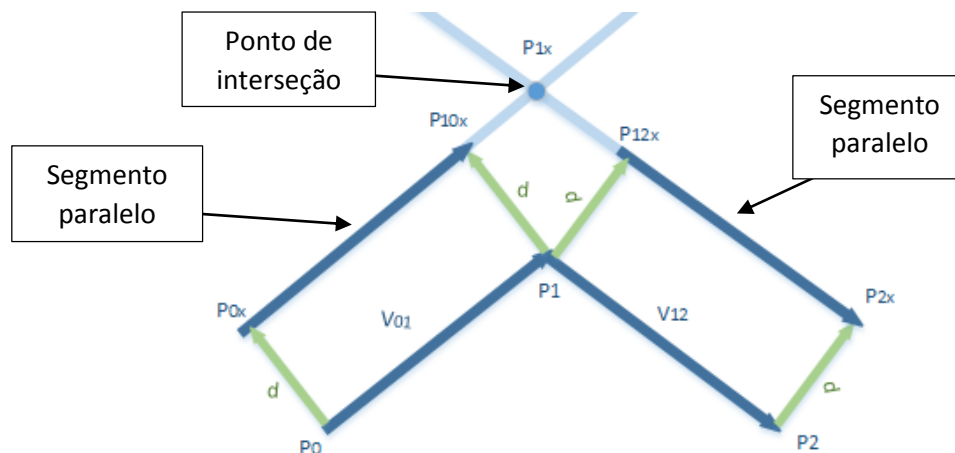


Figura 5.13- Interseção entre duas retas calculadas a partir do Offset dos segmentos

Algoritmo 4: Cálculo da interseção entre duas retas**Entrada:** $P_{0x}, P_{10x}, P_{12x}, P_{2x}$ **Início**

// Cálculo do ponto de interseção

$$P_{1x_x} = \left(\frac{(P_{0x_x} P_{1x_y} - P_{0x_y} P_{1x_x})(P_{2x_x} - P_{3x_x}) - (P_{0x_x} - P_{3x_x})(P_{2x_x} P_{3x_y} - P_{2x_y} P_{3x_x})}{(P_{0x_x} - P_{1x_x})(P_{2x_y} - P_{3x_y}) - (P_{0x_y} - P_{1x_y})(P_{2x_x} - P_{3x_x})} \right)$$

$$P_{1x_y} = \left(\frac{(P_{0x_x} P_{1x_y} - P_{0x_y} P_{1x_x})(P_{2x_y} - P_{3x_y}) - (P_{0x_y} - P_{3x_y})(P_{2x_x} P_{3x_y} - P_{2x_y} P_{3x_x})}{(P_{0x_x} - P_{1x_x})(P_{2x_y} - P_{3x_y}) - (P_{0x_y} - P_{1x_y})(P_{2x_x} - P_{3x_x})} \right)$$

$$P_{1x} = (P_{1x_x}, P_{1x_y})$$

Fim

Todos os passos devem de ser executados para cada contorno gerado pelo algoritmo de corte. O cálculo do *offset* do modelo é segundo processo de maior consumo de tempo de cálculo e de recursos.

5.2.3 – Orientação do filamento

A terceira etapa do método de conversão de um modelo 3D inclui o cálculo da orientação do bico de extrusão. A orientação do bico permite que o filamento extrudido seja sempre orientado para uma determinada posição.

A orientação é executada de forma contínua ao longo dos contornos obtidos no *offset* do modelo. O número de rotações efetuadas é determinado pelo número de vértices gerado pelas interseções dos vários segmentos que compõem o contorno (Figura 5.14).

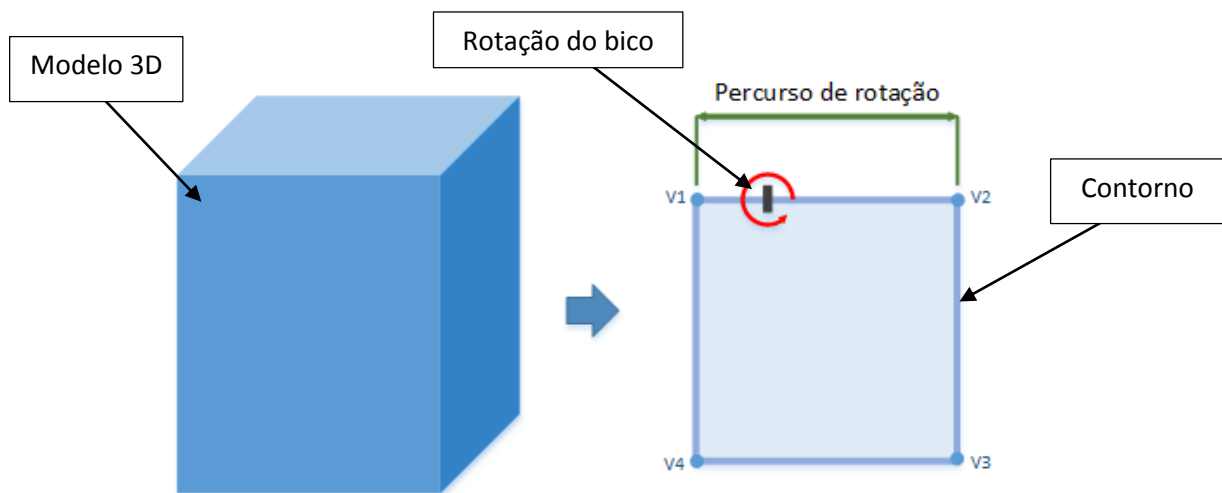


Figura 5.14- Número de vértices que compõem o contorno do modelo.

Se a orientação do bico for realizada exclusivamente em cada vértice do contorno, verifica-se que uma quantidade de material é depositada por excesso nos mesmos. Uma vez que a velocidade e aceleração da rotação é finita, por um espaço de tempo muito curto o extrusor vai se encontrar parado. O local de paragem vai sofrer uma deposição e aquecimento excessivo o que danificará o modelo impresso.

Como solução ao problema referido a rotação do bico deve ser contínua entre os vértices do modelo. Isso garante que desde o início até o fim da impressão o bico nunca vai encontrar-se parado num único ponto.

Cálculo da orientação do filamento

O ângulo de orientação é determinado usando dois segmentos de reta do contorno. É calculado o ângulo entre primeiro segmento e o plano (α_1), e o ângulo formado pelo segundo segmento e o plano (α_2). O ângulo final de rotação (α_f) é calculado subtraindo (α_2) a (α_1) (5.4).

$$\alpha_f = \alpha_2 - \alpha_1 \quad (5.4)$$

A Figura 5.15 mostra como é determinado o ângulo formado entre o segmento e o plano. A rotação para um ângulo (α_f) é feita de forma contínua desde o vértice (V_1)

até ao vértice (V_2). O cálculo do ângulo de orientação deve de ser feito para todos os segmentos que constituem um contorno.

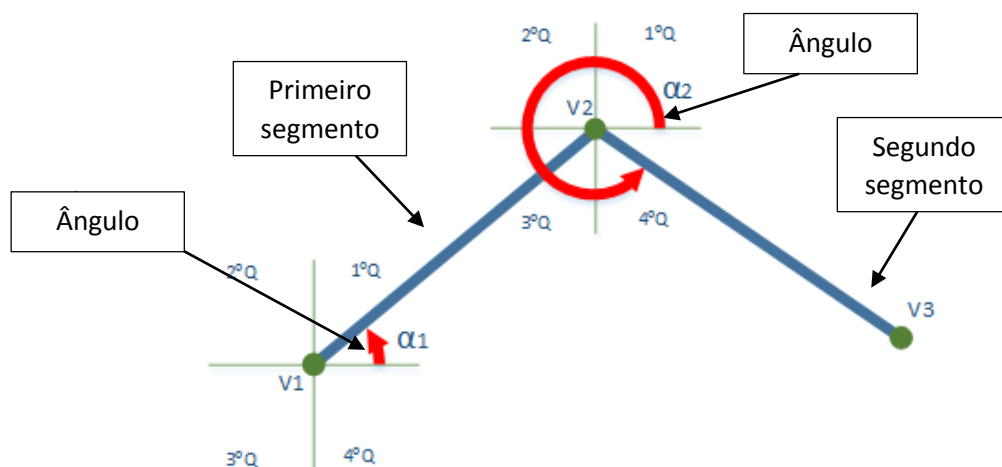


Figura 5.15 – Demonstração do cálculo do ângulo de orientação.

5.2.4 – Preenchimento do interior do modelo

A maioria dos modelos não seriam possíveis ser impressos se não possuíssem estruturas internas que ajudassem suportar as paredes e os tetos do próprio modelo.

O preenchimento dos modelos é iniciado pela conceção de uma matriz, com um número de colunas e de linhas determinada pela percentagem de preenchimento interno pretendida para o modelo impresso. Os pontos obtidos pela matriz permitem gerar entre si segmentos de reta, que servem para determinar o padrão de preenchimento. Neste trabalho o único padrão utilizado é o de linhas cruzadas. Trata-se de um padrão relativamente fácil de obter e que permite obter elevada resistência mecânica dos modelo impressos.

Assim que o padrão de preenchimento estiver definido é feita a interseção entre o padrão obtido e os contornos do modelo. Como resultado é obtido um padrão de preenchimento contido no interior de cada um dos contornos do modelo.

Cálculo do padrão de preenchimento

O cálculo do padrão de preenchimento é determinado por três variáveis, pelo comprimento e a largura da plataforma de impressão e pela percentagem de preenchimento. O número de colunas (N_c), é determinado pelo produto entre o largura

da plataforma de impressão (L_p), e a percentagem de preenchimento (P_p) (5.5). O cálculo do número de linhas (N_l), é determinado pelo produto entre a comprimento da plataforma (C_p) e a percentagem de preenchimento (P_p) (5.6).

$$N_c = L_p \times P_p \quad (5.5)$$

$$N_l = C_p \times P_p \quad (5.6)$$

Por exemplo, para uma plataforma de impressão com 190mm de largura e 140mm de comprimento e 10% de preenchimento é chegado a uma matriz com 19 colunas e 14 linhas. Os valores das dimensões da plataforma de impressão utilizados no exemplo foram obtidos através de medições realizadas à plataforma da impressora *BEETHEFIRST* utilizada neste trabalho.

Cálculo das intersecções entre a matriz e os contornos do modelo

A segunda etapa permite determinar os pontos de interseção entre o padrão obtido pela matriz e os contornos do modelo. Os pontos obtidos pela interseção dão origem aos limites do padrão de preenchimento do modelo. Os pontos são obtidos intersecando cada segmento do contorno com cada coluna ou linha da matriz. As intersecções são calculadas usando o algoritmo 1 utilizado na secção 5.2.2. A Figura 5.16 mostra o resultado da interseção entre o padrão de preenchimento de linhas cruzadas e o contorno do modelo.

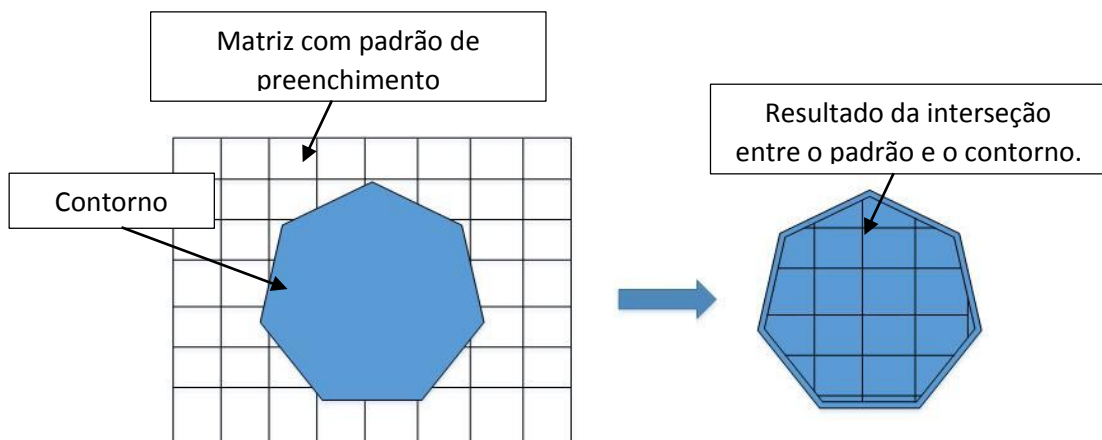


Figura 5.16 - Interseção entre o contorno do modelo e o padrão de preenchimento.

5.2.5 – Código G-Code

Esta secção é destinada ao estudo e desenvolvimento de um algoritmo capaz de gerar um conjunto de instruções interpretáveis à impressora 3D. O gerador de G-Code é o nome dado a um algoritmo desenvolvido especialmente para o programa de corte utilizado no presente trabalho. Este é responsável por interpretar todos os valores obtidos pelos algoritmos desenvolvidos nas secções 5.2.2, 5.2.3 e 5.2.4, mas também pela validação dos mesmos. Após a leitura e processamento de todos os dados é obtido como resultado final um ficheiro com comandos G-Code de coordenadas absolutas que é enviado para a impressora 3D.

O algoritmo responsável por gerar um ficheiro com instruções G-Code é dividido em quatro partes principais: leitura dos pontos de Offset, leitura dos valores de orientação do bico do extrusor, leitura dos pontos obtidos pelo preenchimento do interior do modelo, e cálculo do fluxo do material de extrusão.

É de salientar que a sequência de comandos *G-Code* gerados pelo algoritmo implementado, vai depender da ordem como são obtidas as camadas do modelo. É necessário frisar que o código gerado para camada do modelo, é iniciado pelas instruções de impressão dos contornos seguido das instruções de preenchimento do interior do modelo. Toda a estrutura do ficheiro G-Code gerado vai seguir esta ordem.

Leitura dos pontos de Offset

A primeira etapa é responsável pela leitura e processamento de todos os pontos obtidos pela implementação do algoritmo de *offset* mostrado na secção 5.2.2. Nesta etapa, o algoritmo começa por ler dois pontos do contorno, faz a interpretação dos mesmos e gera duas instruções G-Code. De seguida é lido mais um ponto do contorno mas neste caso é gerada apenas uma instrução. Este processo é repetido até que tenham sido lidos todos os pontos de *offset*.

Os primeiros dois pontos do contorno vão gerar uma instrução (*G0*) e uma instrução (*G1*). A instrução (*G0*) vai representar um movimento rápido sem deposição de material enquanto a instrução (*G1*) vai representar um movimento lento mas com

deposição de material. A instrução G0 é utilizada para realizar travessias e fazer posicionamentos. Os restantes pontos vão gerar apenas uma única instrução (G1). É de frisar que o primeiro ponto do contorno vai ser lido duas vezes, de maneira a que o contorno fique fechado. Ou seja, inicialmente o primeiro ponto vai gerar uma instrução (G0) e no final uma instrução (G1). A Figura 5.17 mostra a conversão dos pontos obtidos no Offset do modelo em instruções G-Code.

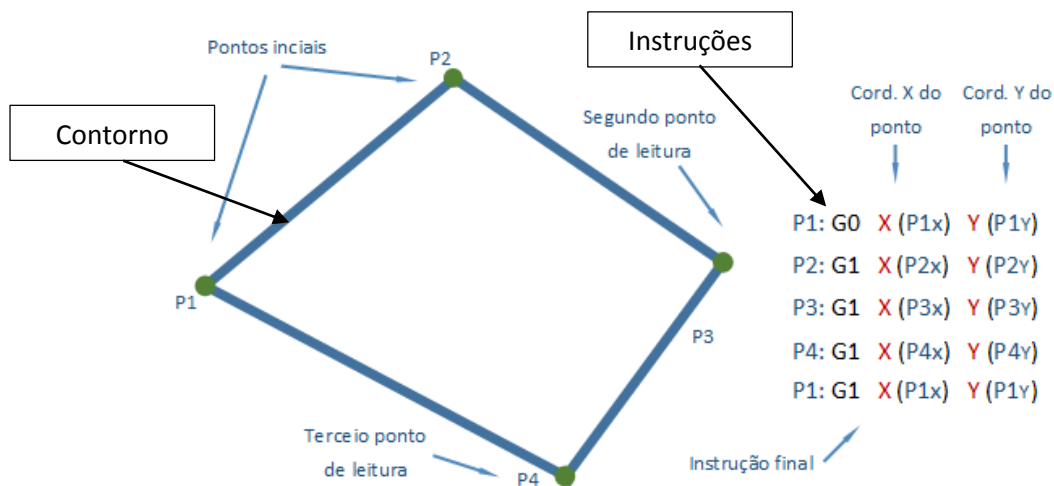


Figura 5.17 - Leitura dos pontos de Offset de um contorno e respetiva conversão em instruções.

Leitura dos valores de orientação

A segunda etapa é responsável pela leitura de todos os valores obtidos pela implementação do algoritmo de orientação do filamento. Cada um dos valores lidos vai indicar o ângulo de rotação necessário efetuar entre dois pontos.

Nesta etapa em particular é introduzido um novo caracter de instrução (C). Quando introduzido numa instrução G-Code vai indicar ao controlador da máquina que naquela instrução vai ser necessário executar uma rotação com um ângulo específico. Este caracter vai ser introduzido nas instruções geradas na etapa anterior. A Figura 5.18 mostra como é introduzida a componente de rotação em instruções G-Code

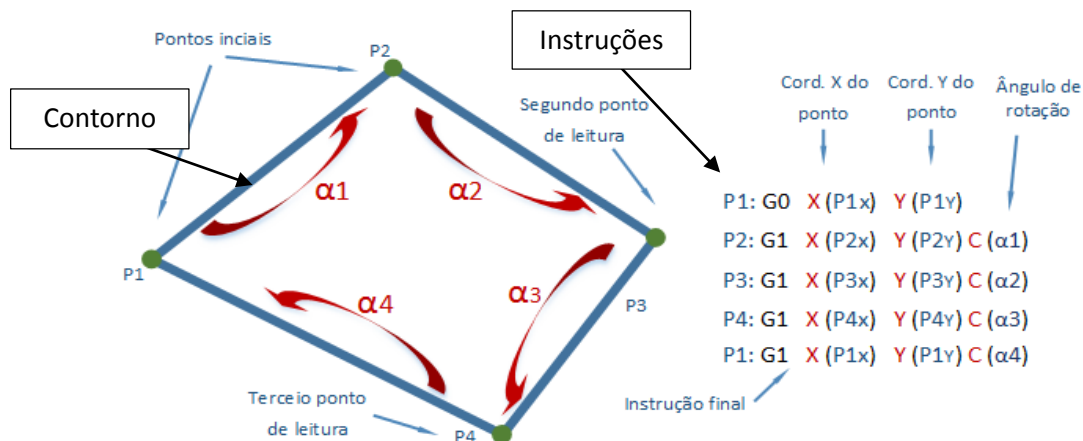


Figura 5.18 - Introdução da componente de rotação em instruções G-Code.

Leitura dos valores obtidos pelo preenchimento do modelo

A terceira etapa é responsável por ler todos os pontos gerados pelo preenchimento do volume interno do modelo. Como se trata de um padrão de preenchimento, este vai ser constituído apenas por segmentos de reta e não por um contorno fechado. Nesta etapa, o algoritmo começa por ler dois pontos, o primeiro vai gerar uma instrução (G0) e o segundo uma instrução (G1). Como é iniciado um novo percurso a cada dois pontos, os pontos seguintes vão gerar novamente uma instrução (G0) e (G1). Este processo repete-se até que tenham sido lido todos os pontos gerados pelo algoritmo preenchimento. A Figura 5.19 mostra as instruções geradas pelo preenchimento interno do modelo

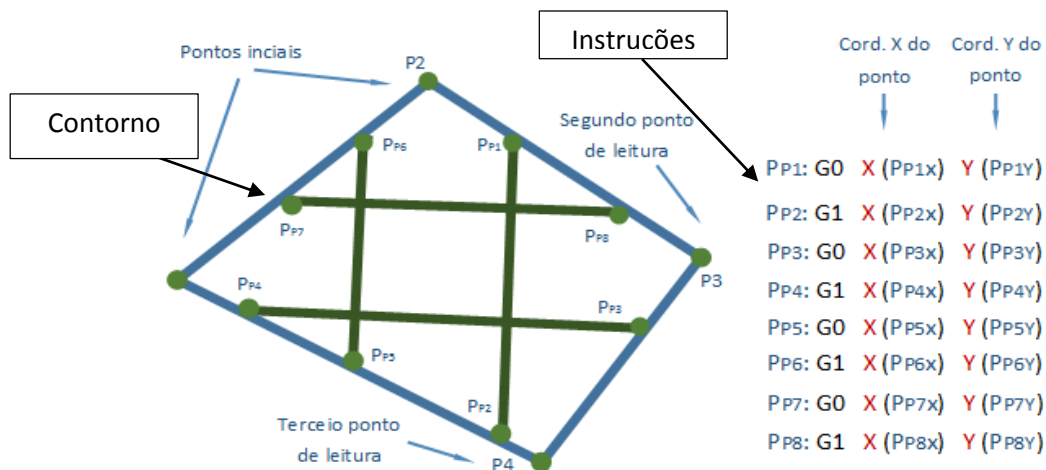


Figura 5.19 - Instruções geradas pela leitura dos pontos de preenchimento.

Cálculo do fluxo do material de extrusão

Para cada segmento do contorno é necessário determinar a quantidade de fluxo de material que será depositado. Para isso é necessário mais uma vez ler todos os segmentos do contorno e calcular o comprimento dos mesmos. Assim que for calculado o comprimento segmento é necessário determinar a quantidade de volume de material a ser depositada em cada contorno. O volume está relacionado com o comprimento do contorno e com a resolução das camadas do modelo. O volume de material depositado para cada contorno vai variar de forma linear com a espessura de cada camada, ou seja, quanto menor for a resolução pretendida maior será o volume depositado por camada.

O comprimento do segmento (C_s) é calculado utilizando as coordenadas dos dois pontos de limitam o segmento. O seguinte algoritmo mostra como é determinado o comprimento de cada segmento.

Algoritmo 5: Cálculo do comprimento do segmento do contorno

Entrada: P_0, P_1

Início

Se $P_{0x} < P_{1x}$ **então**

$$C_x = P_{1x} - P_{0x}$$

Senão

$$C_x = P_{0x} - P_{1x}$$

Fim se

Se $P_{0y} < P_{1y}$ **então**

$$C_y = P_{1y} - P_{0y}$$

Senão

$$C_y = P_{0y} - P_{1y}$$

Fim se

// Comprimento do segmento

$$C_s = \sqrt{C_x^2 + C_y^2}$$

Fim

Uma vez calculado o comprimento do segmento é necessário determinar a quantidade de volume de material a depositar. O volume de material depositado vai ser

igual ao volume de filamento que é tracionado pelo sistema de tração, logo é possível determinar o comprimento de filamento necessário para um volume específico . Para isso é necessário inicialmente calcular o volume depositado que se assemelha a um paralelepípedo que é igual ao volume do material que é tracionado (Figura 5.20).

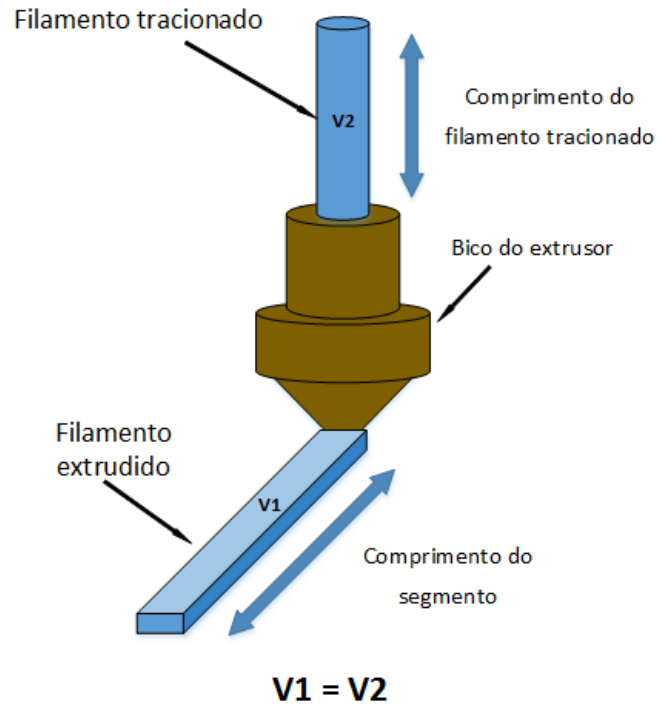


Figura 5.20 - Relação entre o material extrudido e o filamento tracionado.

O cálculo do volume (V_d) vai depender do comprimento do segmento (C_s), da espessura da camada (E_c), e da espessura da parede do modelo (E_p) (5.7).

$$V_d = C_s \times E_c \times E_p \quad (5.7)$$

Uma vez obtido o volume de material extrudido é possível encontrar o comprimento de filamento necessário para obter o mesmo volume de material. O comprimento de filamento vai depender do volume (V_d) calculado em (5.7) e do diâmetro do filamento (D_f) (5.8).

$$C_f = \frac{V_d}{\pi \times D_f^2} \quad (5.8)$$

Uma vez obtidos todos os comprimentos de filamento necessário para cada segmento do contorno é necessário inserir essa informação nas instruções de *G-Code*. O comprimento do filamento vai indicar à impressora quanto filamento deve ser tracionado de forma a obter o volume de material necessário.

Neste caso existe a necessidade de introduzir um novo caracter (*E*) que indica o comprimento do filamento necessário para cada segmento. Quando lido pela impressora 3D, o sistema de tração é acionado e é feita a tração de filamento com o comprimento determinado pelo valor que acompanha o caracter (*E*). Este deve ser inserido nas instruções geradas para o preenchimento do contorno e para o preenchimento interno do modelo. A Figura 5.21 mostra o resultado da inserção da instrução de tração do filamento no conjunto de instruções de preenchimento do contorno.

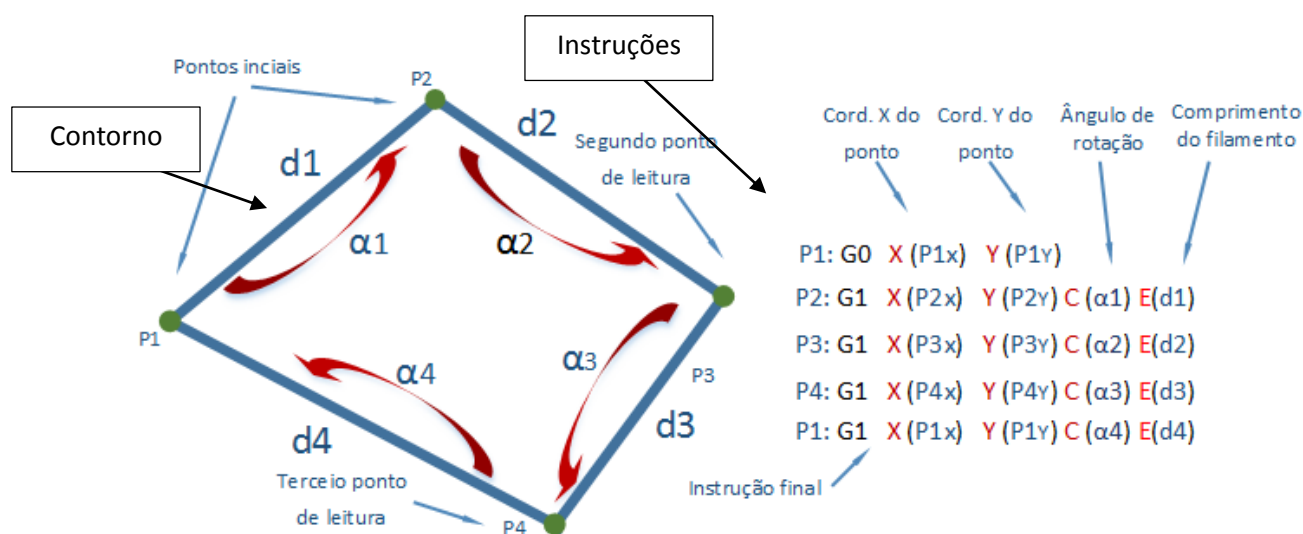


Figura 5.21- Introdução do comprimento do filamento nas instruções de controlo.

5.2.6 – Ambiente gráfico do programa de corte

Após a implementação dos algoritmos referidos nas secções anteriores foi desenvolvida uma interface gráfica simples que permite ao utilizador alterar um conjunto de parâmetros base.

A interface gráfica permite inserir valores para a espessura da camada, a quantidade de preenchimento pretendido e o número de camadas totalmente preenchidas do modelo. Estes parâmetros são suficientes para produzir uma impressão de qualidade e de uma forma controlada. Outras funcionalidades são implementadas no programa de corte mas não estão acessíveis ao utilizador.

Na Figura 5.22 encontra-se discriminado respetivamente os parâmetros implementados no programa de corte.

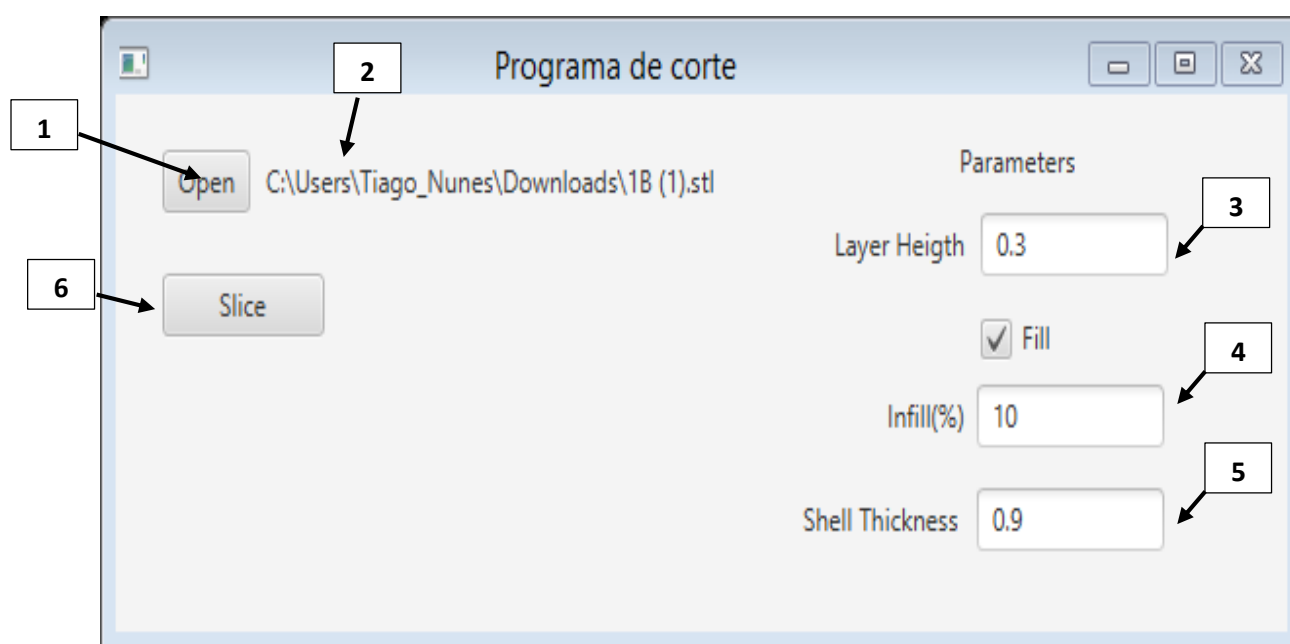


Figura 5.22 - Interface gráfico desenvolvido para o programa de corte.

Nos pontos que se seguem indica-se o procedimento a adotar pelo utilizador para a impressão de modelo 3D utilizando o programa de corte desenvolvido.

1. O botão de Open permite abrir o ficheiro STL pretendido.
2. Uma vez aberto, e mostrado o caminho onde o ficheiro STL se encontra.
3. Introduzir o valor em milímetros da espessura para cada camada do modelo.
4. Inserir o valor pretendido em percentagem para o preenchimento interno do modelo 3D.
5. Inserir o valor em milímetros da espessura da base e dos topos do modelo.

6. Pressionar o botão e aguardar até que conversão esteja concluída.

Uma vez pressionado o botão de *Slice* é gerado um ficheiro STL com um conjunto de instruções G-Code interpretáveis pela impressora 3D utilizada neste projeto. O envio do ficheiro gerado pelo programa é feito utilizando uma consola desenvolvida pela empresa *BEEVERYCREATIVE* (Figura 5.23). Esta permite o envio do ficheiro gerado, mas também enviar comandos individuais para o controlo manual da impressora 3D.

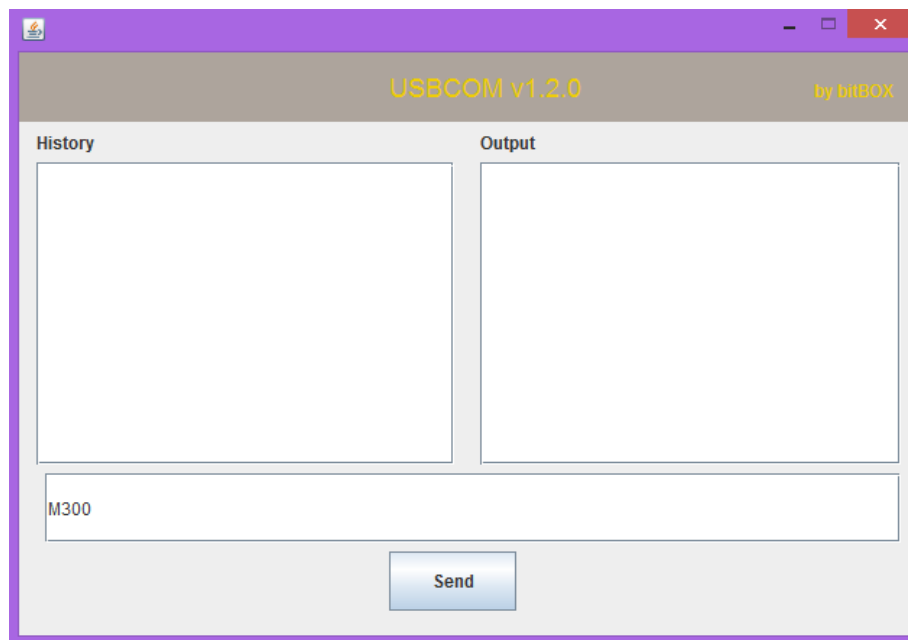


Figura 5.23 - Consola de controlo da impressora 3D.

Capítulo 6

6 – Resultados

6.1 – Introdução

No decorrer deste trabalho foi realizado um conjunto de testes com o objetivo em avaliar o desempenho da tecnologia proposta, assim como as capacidades físicas do equipamento construído.

Na parte inicial deste capítulo é feita uma descrição dos materiais utilizados para a realização de testes. Além disso é uma descrição dos resultados obtidos pelos testes realizados aos sistemas desenvolvidos. Posteriormente, apresenta-se os resultados experimentais e os ensaios de várias peças em PLA impressas na impressora 3D *BEETHEFIRST*. Foram impressos um conjunto de modelos e avaliados pelo tempo de impressão, qualidade de impressão e resistência mecânica com o intuito de fazer uma análise comparativa entre os resultados obtidos pelos provetes impressos pelo extrusor ajustável e os provetes obtidos pelo extrusor tradicional.

6.2 – Materiais utilizados

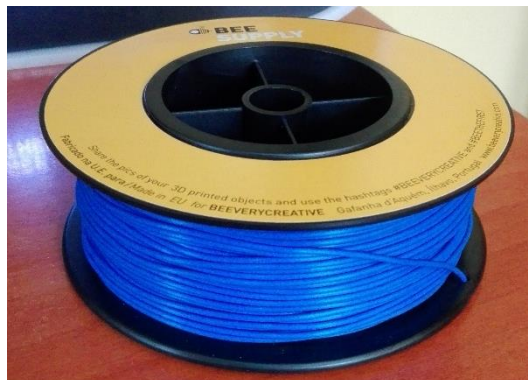
Para a realização do seguinte trabalho foram utilizados dois filamentos de cores diferentes de um material termoplástico *Polylatic Acid* (PLA) com 1.75 mm de diâmetro. A utilização de filamentos com cores diferentes é justificada pelas diferenças que podem existir entre filamentos produzidos da mesma forma mas com pigmentações diferentes. As características dos materiais têm grande influência na qualidade final do modelo impresso. É comum obter dois modelos impressos com qualidades superficiais diferentes simplesmente mudando o filamento utilizado. Para realizar impressões de qualidade aceitável, é necessário fazer testes exaustivos aos filamentos utilizados, para obter os parâmetros ideais de utilização dos mesmos.

Os materiais utilizados podem ser visualizados nas Figura 6.1, à esquerda um filamento de cor verde (Figura 6.1 a)) e à direita um filamento de cor azul (Figura 6.1 b)). Os pontos ótimos de temperatura de extrusão são respetivamente

230 °C para o de cor verde e 225 °C para o de cor azul. Os dois filamentos serão usados exclusivamente para testes realizados na secção 6.4.2.



a)



b)

Figura 6.1- Filamentos utilizados para a realização de testes. a) Filamento de cor verde. b) Filamento de cor azul.

6.2 – Análise das características do equipamento desenvolvido

Na presente secção é realizado um conjunto de ensaios de verificação das capacidades do sistema de extrusão ajustável.

6.2.1 – Extrusor ajustável

A análise experimental envolve a avaliação do extrusor ajustável nos seguintes pontos:

- **Velocidades de extrusão** – observar o comportamento do extrusor para quatro velocidades diferentes, avaliando se o sistema consegue fazer extrusões sem encravamento. O extrusor é testado para velocidades entre os 5 mm/s e os 20 mm/s com incrementos de 5mm/s. As velocidades escolhidas permitem testar o extrusor para baixas e altas velocidades de impressão.
- **Qualidade do material extrudido** – observar a qualidade do filamento extrudido para as diferentes velocidades de extrusão.
- **Largura do filamento extrudido** – observar as dimensões do filamento extrudido para diferentes velocidades de extrusão.

Velocidades de extrusão

Para proceder às avaliações mencionadas executou-se o seguinte procedimento: aquecimento do sistema de extrusão a uma temperatura de 230 °C, seguidamente procedeu-se a extrusão do filamento para uma gama de velocidades entre os 5mm/s e os 20 mm/s com incrementos de 5mm/s. Observou-se que o extrusor ajustável consegue facilmente realizar extrusões para as velocidades testadas. A análise do padrão gravado no filamento pelo sistema de tração mostra se existe ou não dificuldades na realização da extrusão do material. Como mostra a Figura 6.2 o padrão gravado no filamento encontra-se muito bem definido e sem sinais de desgaste, o que significa que o filamento está a ser extrudido com bastante facilidade.

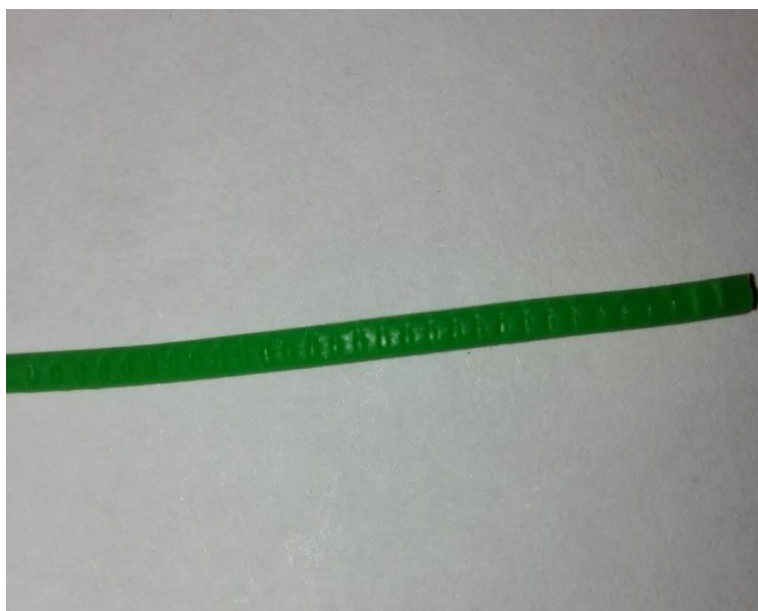


Figura 6.2 - Padrão cravado no filamento pelo sistema de tração.

Qualidade do material extrudido

Em relação ao material extrudido observou-se que este possui boa qualidade superficial. O filamento extrudido a velocidades entre os 5 mm/s e os 20 mm/s não apresentou qualquer tipo de irregularidades.

Quando ocorrem problemas de extrusão o filamento vai apresentar um conjunto de defeitos visíveis. Um dos possíveis defeitos são as bolhas de ar que surgem na superfície do filamento. A Figura 6.3 mostra os filamentos extrudidos a diferentes velocidades.

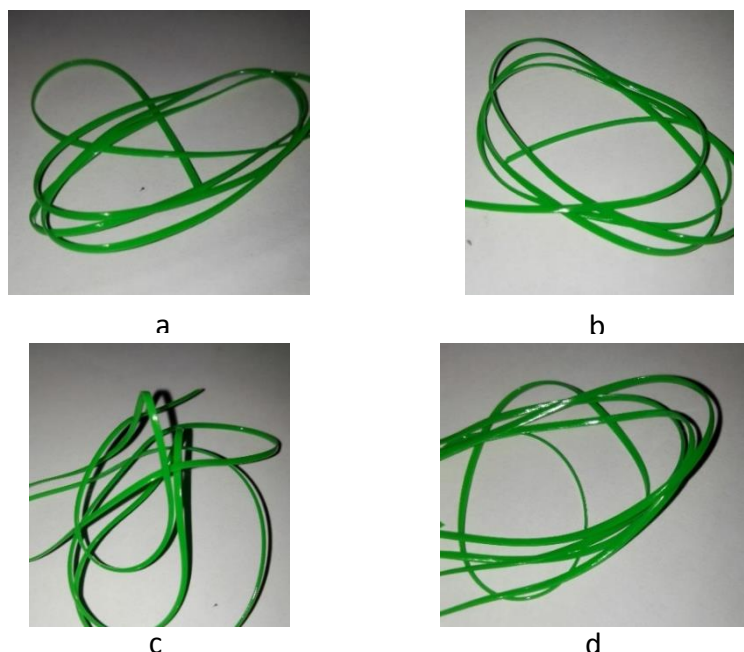




Figura 6.3 - Qualidade dos filamentos extrudido. a) 5mm/s . b) 10 mm/s. c) 15 mm/s. d) 20mm/s.

Como se pode observar o filamentos que possuem superfícies lisas e brilhantes. O brilho do filamento indica se a temperatura escolhida para a extrusão é a correta ou não.

Dimensões do filamento extrudido

Foi também analisada a largura do material extrudido às velocidades utilizadas nos testes anteriores. É analisado as dimensões do perfil retangular do filamento extrudido para quatro casos. Os resultados obtidos podem ser observados na Tabela 6.1, que mostra as dimensões obtidas para os quatro testes realizados. As dimensões ideais do filamento extrudido são de 0.8 mm de largura e 0.2 mm de comprimento.

Tabela 6. 1 - Dimensões do filamento obtido para uma gama de velocidades de extrusão.

Velocidade	Largura 	Comprimento 
5 mm/s	0.81 mm	0.2 mm
10 mm/s	0.83 mm	0.22 mm
15 mm/s	0.85 mm	0.24 mm
20 mm/s	0.87 mm	0.25 mm

É de notar que à medida que velocidade de extrusão aumenta as dimensões do filamento também aumentam. Apesar das diferenças, estas não causam qualquer tipo de danos na qualidade das peças impressas.

6.3 – Análise das funcionalidades do Programa de corte

Esta secção é destinada a realização de pequenos testes de verificação das capacidades do programa de corte.

6.3.1 – Programa de corte

A análise experimental do programa de corte avalia os seguintes pontos:

- **Corte de um modelo em várias resoluções** – observar a capacidade de corte de um modelo para várias resoluções. É realizado impressões para valores de resolução de 300 μm , 200 μm , 100 μm , e 50 μm .
- **Capacidade em gerar preenchimentos internos** – verificar a capacidade em gerar preenchimentos internos de diferentes gamas. É realizado um conjunto de impressões com preenchimento entre os 5% e os 20 %, com um incremento de 5%.
- **Capacidade em gerar instruções de controlo** – analisar o código G-Code gerado pelo programa de corte e visualiza-lo através de um programa de visualização de G-Code.

Para proceder às avaliações foi necessário escolher um provete de testes. A Figura 6.4 mostra o provete escolhido, que servirá como modelo de teste nesta secção.

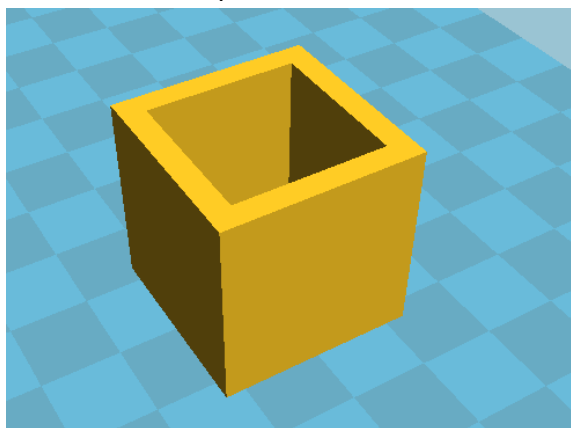


Figura 6. 4 - Provete escolhido para a realização de testes do programa de corte.

Corte de um modelo em várias resoluções

A primeira análise consiste em avaliar a capacidade de resposta do algoritmo de corte para diferentes resoluções. Observou-se que para as quatro resoluções escolhidas o programa conseguiu realizar a operação de corte sem gerar qualquer tipo de erros. É de salientar que quando maior for a resolução por camada, melhor é a qualidade de impressão.

Além da análise da capacidade de corte do modelo é feito também uma análise ao tempo que o programa demora a fatiar o modelo para cada resolução. A Tabela 6.2 mostra os resultados obtidos para as diferentes resoluções. É de salientar que quando maior for a resolução pretendida maior é o tempo de processamento.

Tabela 6.2 - Tempo de corte do modelo para diferentes resoluções.

Resolução	Tempo de processamento (segundos)
300 μm	1.2 s
200 μm	2 s
100 μm	3.2 s
50 μm	4 s

Capacidade em gerar preenchimentos internos

Em relação à capacidade de gerar preenchimento interno foram feitas impressões com 5%, 10%, 15 % e 20 % para o modelo de teste utilizado nesta secção. Os valores de preenchimento escolhidos, são valores padrão utilizados para a maioria das impressões realizadas. Acima de 20 % o preenchimento passa a consumir muito tempo de impressão e de filamento.

Verificou-se que o programa de corte conseguiu gerar um preenchimento interno para o modelo, para os valores pretendidos. A Figura 6.5 mostra o preenchimento gerado pelo programa para as percentagens escolhidas. Cada modelo foi impresso com uma resolução de 100 μm por camada.

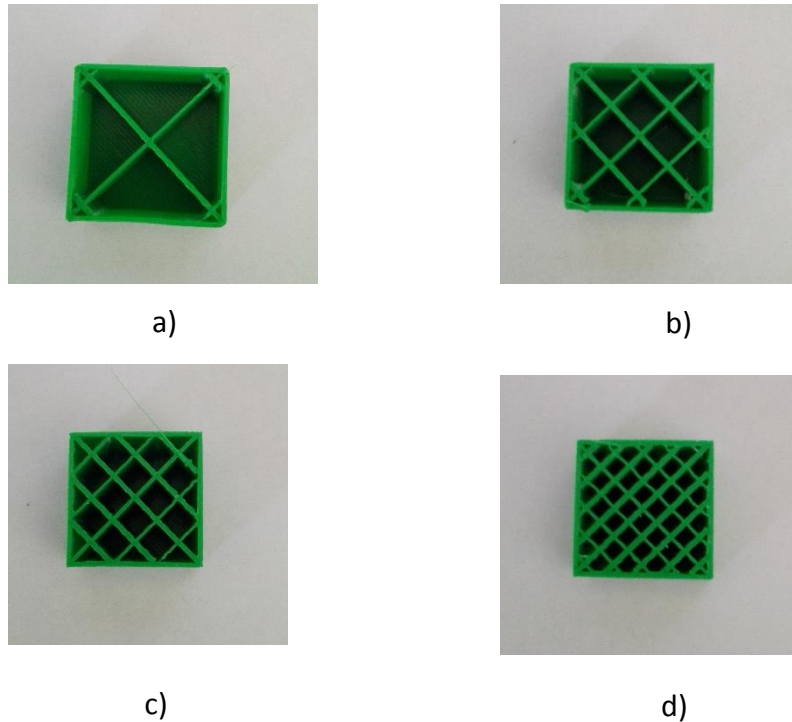


Figura 6.5 - Preenchimento gerado pelo programa de corte. a) 5 % b) 10% c) 15% d) 20 %

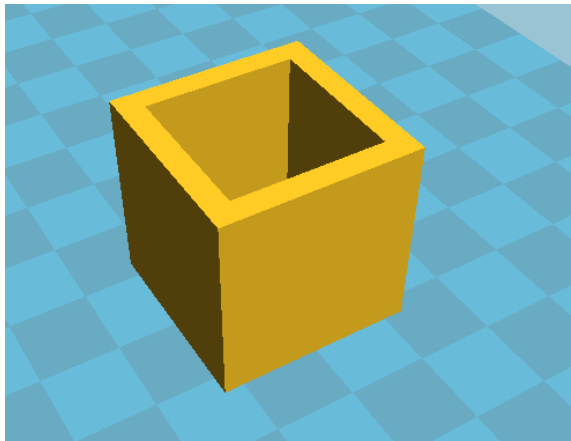
Capacidade em gerar instruções de controlo

Foi também testado a capacidade do programa de corte em gerar um conjunto de instruções G-Code interpretáveis pela impressora 3D. Constatou-se a eficácia do programa em gerar um ficheiro G-Code com um conjunto de instruções apresentadas na secção 5.2.5. Para isso foi feito uma impressão do modelo de teste com o código gerado pelo programa de corte. A Figura 6.6 mostra uma porção de código gerado da primeira camada do modelo.

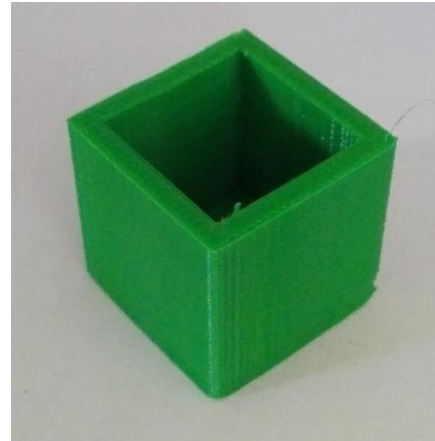
```
;Layer
G0 F10000.0 X12.0 Y12.0 C-45.0 Z0.1
G1 F3750.0 X-12.0 Y12.0 C-135.0 E0.849
G1 F3750.0 X-12.0 Y-12.0 C-225.0 E1.697
G1 F3750.0 X12.0 Y-12.0 C-315.0 E2.545
G1 F3750.0 X12.0 Y12.0 C-405.0 E3.393
G0 F4000 E0.893
```

Figura 6.6- Código gerado para a impressão da primeira camada do modelo.

A Figura 6.7 mostra o resultado da impressão utilizando o código G-Code gerado pelo programa de corte. À direita encontra-se o modelo 3D (Figura 6.7 a)) e à esquerda respectivo modelo impresso (Figura 6.7 b)).



a)



b)

Figura 6.7 - Modelo de teste. a) Modelo 3D b) Modelo impresso.

6.4 – Ensaios e Procedimentos

O programa experimental compreendeu a aplicação de três procedimentos diferentes. No primeiro procedimento é medido o tempo de impressão para um conjunto de peça impressas. De seguida é comparado entre o tempo total de impressão dos modelos impressos obtidos no extrusor ajustável e o extrusor convencional.

No segundo procedimento é analisado a qualidade superficial dos modelos impressos pelo extrusor ajustável referidos no primeiro procedimento. É feito uma análise com detalhe ao preenchimento e a qualidade das superfícies obtidas nos modelos impressos.

Para todos os modelos de impressos com o extrusor convencional será utilizado um programa de corte profissional chamado Cura.

6.4.1 – Tempo de impressão

Nesta seção é feito uma análise do tempo total de impressão para dois modelos diferentes. Cada modelo será impresso em quatro resoluções diferentes. Os resultados obtidos são os seguintes:

Primeiro teste

No primeiro teste será utilizado o modelo mostrado na Figura 6.8. Trata-se de um modelo de uma engrenagem com 55 dentes. É um modelo possui alguma dificuldade de impressão devido à sua forma e ao número de contornos que possui.




Figura 6. 8 -Modelo de teste escolhido para o primeiro teste experimental.

Neste teste foi feito um conjunto de impressões utilizando o sistema de extrusão ajustável e o sistema de extrusão convencional. Pretende-se avaliar o tempo de impressão do modelo para diferentes valores de resolução.

Verificou-se que para todos os modelos impressos a redução do tempo de impressão foi superior a 50 % em relação aos modelo impressos por métodos convencionais. É de salientar que alguns percursos específicos gerados pelo *Cura*, não foram implementados pelo programa de corte desenvolvido neste trabalho. A Tabela 6.3 mostra os tempos de impressão obtidos pelos dois sistemas de extrusão.

Tabela 6.3 - Tempos de impressão obtidos no primeiro teste.

Modelo Impresso	Resolução	Tempo impressão (extrusor ajustável)	Tempo impressão (extrusor convencional)	Ganho (%)
	300 µm	25 min	50 min.	50%
	200 µm	35 min.	1 Hora e 11 min.	54%
	100 µm	1 Hora e 20 min.	2 Horas e 40 min.	50%
	50 µm	2 Horas e 40 min.	5 Horas e 35 min.	52.2%

Segundo teste

Para o segundo teste de impressão foi escolhido o modelo mostrado na Figura 6.9, por se tratar de um modelo com bastantes detalhes e com zonas sensíveis. Podemos também verificar que existem algumas zonas suspensas.

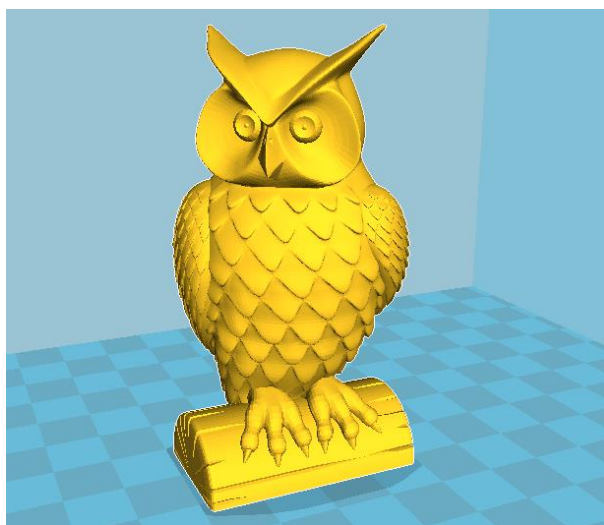



Figura 6.9 - Segundo modelo de teste.

Tal como no primeiro teste, os resultados obtidos foram os esperados. A redução do tempo de impressão foi para todos os casos superior a 50%, que comprova mais uma vez a capacidade da redução do tempo total de impressão mesmo para modelos diferentes. A Tabela 6.4 mostra os tempos de impressão obtidos pela utilização das duas tecnologias de extrusão.

Tabela 6.4 - Tempos de impressão obtidos no segundo teste.

Modelo Impresso	Resolução	Tempo impressão (extrusor ajustável)	Tempo impressão (extrusor convencional)	Ganho
	300 μ m	35 min	1 Hora e 17 min.	56%
	200 μ m	55 min.	1 Hora e 55 min.	52%
	100 μ m	1 Hora e 50 min.	3 Horas e 55 min.	53%
	50 μ m	3 Horas e 25 min.	7 Horas e 14 min.	52 %

6.4.2 – Qualidade de impressão

Nesta Secção é feita a análise da qualidade superficial dos modelos impressos na secção anterior. É descrito com detalhe dos aspetos positivos e negativos da qualidade superficial obtida nos modelos impressos. Para a análise superficial serão utilizados apenas os modelos impressos na resolução de 100 μ m por se tratar de uma resolução intermédia.

Primeira análise

A análise feita ao modelo impresso focar-se-á em dois aspetos, na qualidade superfícies e na qualidade do preenchimento. A Figura 6.10 mostra o modelo analisado nesta secção. Nesta figura encontra-se um conjunto de indicadores que apontam para partes específicas da peça. Cada uma das zonas indicadas será de seguida analisada com rigor, apresentando os aspetos positivos ou negativos das mesmas.

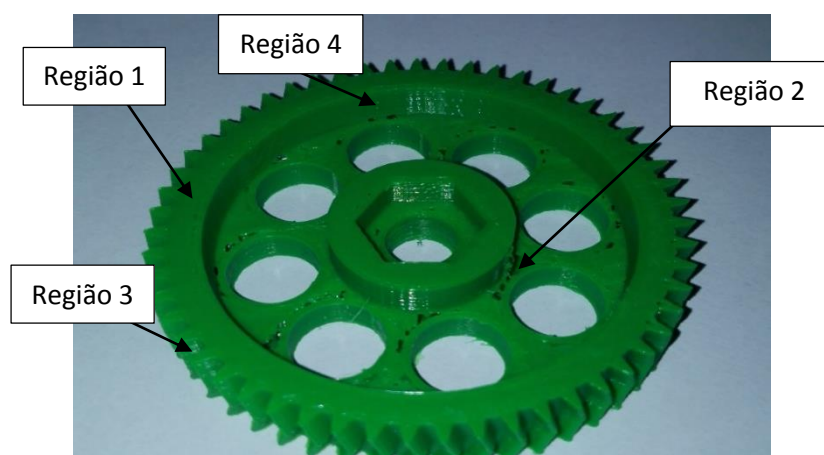


Figura 6. 10 – Primeiro modelo de análise da qualidade superficial

De seguida é feita a análise do modelo tendo como base a análise da qualidade superficial e a qualidade do preenchimento. As regiões analisadas na Figura 6.10 são:

- **Região 1:** Verificou-se que as camadas que constituem o topo do modelo encontram-se bem fechadas e com superfícies muito lisas. Não apresentam irregularidades nem qualquer tipo de defeito.
- **Região 2:** Verificou-se que o preenchimento dos topos intermédios não foi realizados com sucesso. Existem áreas que não foram totalmente preenchidas.
- **Região 3:** Verificou-se que a parede externa do modelo foi corretamente impressa sem qualquer tipo de feitos.
- **Região 4:** Provou-se que as paredes internas do modelo possuem bom acabamento superficial.

De uma forma geral a peça impressa apresentou bom acabamento superficial tirando as partes de preenchimento dos topos. Para resolver o problema de mau preenchimento dos topos é necessário reconfigurar os parâmetros do programa de corte mas também melhorar o sistema de arrefecimento. Para este caso é necessário aumentar a taxa de fluxo do material depositado e aumentar o caudal de ar debitado pelo sistema de arrefecimento. Quando for encontrado uma relação ideal entre estes dois parâmetros é possível preencher os topos do modelo com a qualidade pretendida.

Segunda análise

A análise feita ao segundo modelo impresso focar-se-á também em dois pontos, na qualidade superfícies e na qualidade do preenchimento. A Figura 6.11, mostra o modelo analisado nesta secção. Nesta figura encontra-se um conjunto de indicadores que apontam para partes específicas da peça. Cada uma das zonas indicadas será de seguida analisada com rigor, apresentando os aspetos positivos ou negativos das mesmas.

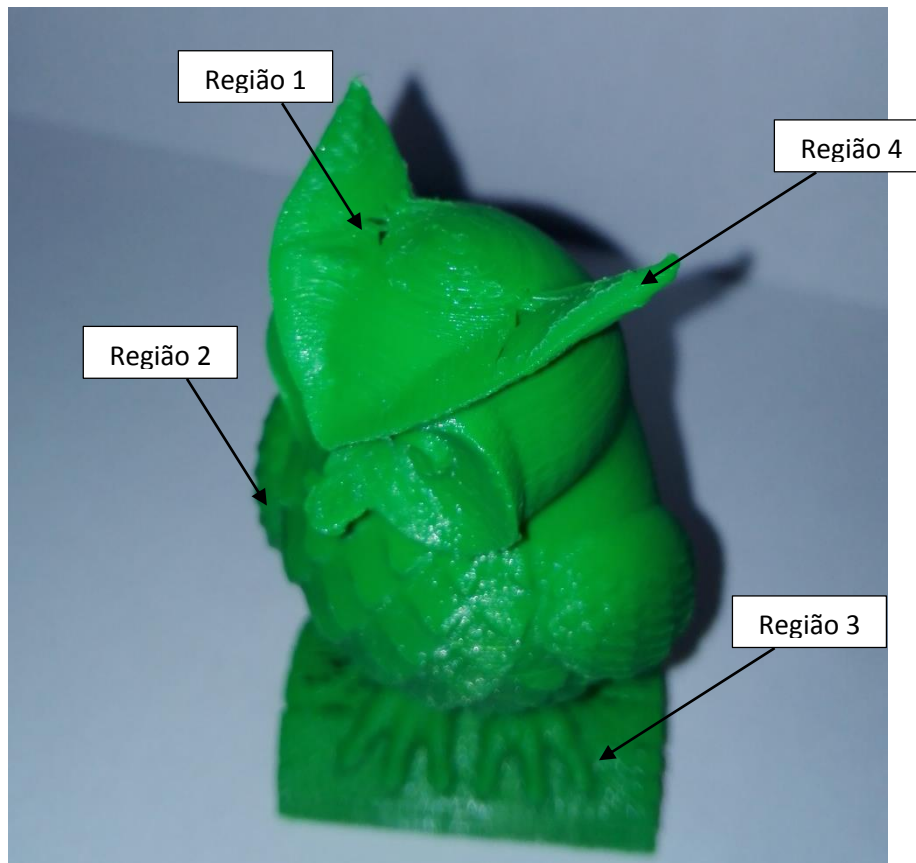


Figura 6.11 – Segundo modelo de análise da qualidade superficial

De seguida é feita a análise do modelo tendo como base a análise da qualidade superficial e a qualidade do preenchimento. As regiões analisadas na Figura 6.11 são:

- **Região 1:** Verificou-se que o preenchimento dos topos do modelo não foi realizado com sucesso. Existem áreas que não foram totalmente preenchidas.
- **Região 2:** Verificou-se que a parede externa do modelo foi corretamente impressa sem qualquer tipo de feitos.
- **Região 3:** Verificou-se que os detalhes do modelo foram bem impressos não apresentando qualquer defeito superficial.
- **Região 4:** Nesta região verificou-se uma falha no sistema de arrefecimento.

Tal como o modelo anterior, a qualidade superficial foi a desejada. Todos os pormenores do modelo foram corretamente impressos e não apresentaram qualquer tipo de defeito. No entanto, é de frisar o mau dimensionamento do sistema de

arrefecimento, que é visível pela análise feita à região 1 e à região 4. As falhas de preenchimento nos topos ou deformações da peça devido ao aquecimento excessivo podem ser resolvidas se for aumentado o caudal de ar debitado pelo sistema de arrefecimento.

Comparação entre os modelos impressões em diferentes cores

Após a impressão dos dois modelos em duas cores diferentes constatou-se que os modelos impressos em verde apresentaram melhor qualidade superficial. A análise foi feita através da comparação a olho nu dos modelos para resoluções de 100 µm por camada.

A diferença de qualidade dos modelos deve-se à temperatura de impressão utilizada e das propriedades dos materiais utilizados.

6.4.3 – Resistência mecânica

Nesta secção é feita a análise a resistência mecânica dos modelos impressos utilizando o sistema de extrusão ajustável.

É de salientar que a resistência mecânica adquirida pelas peças impressas vai depender de parâmetros como, a espessura da parede do modelo, da percentagem de preenchimento interno, e da geometria da própria peça. Os modelos sujeitos a testes de resistência mecânica têm 0.8mm de espessura de parede e 10% de preenchimento interno. As seguintes análises fazem o estudo à resistência mecânica dos dois modelos impressos na secção 6.4.1.

Para cada um dos modelos analisados é feito um teste de resistência à deflexão (Figura 6.12) e a comparação entre os resultados obtidos nos modelos impressos pelo extrusor convencional e o extrusor ajustável.

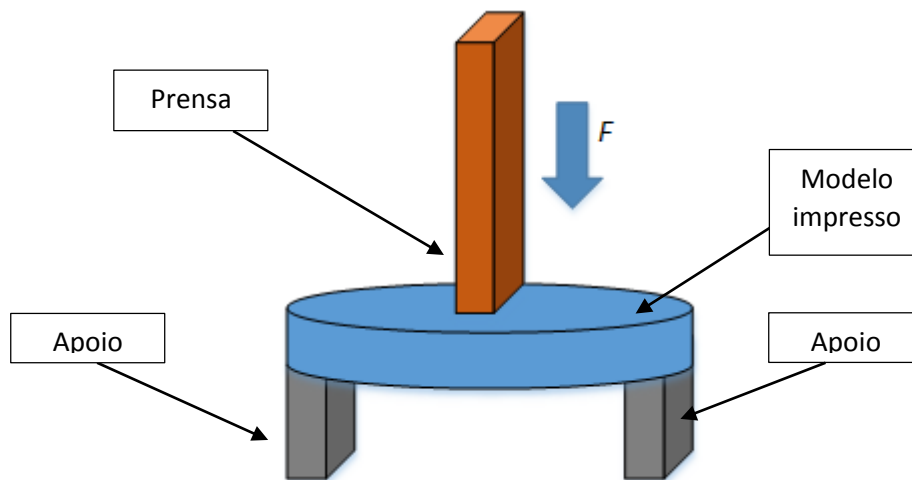


Figura 6.12 - Teste da resistência mecânica à deflexão

Primeira análise

O primeiro modelo impresso foi submetido a um teste de deflexão. Este foi colocado entre dois apoios e foi sujeito a uma força aplicada no centro da peça. Foi inicialmente aplicada uma força de 1Kg que foi aumentando com incrementos sucessivos de 0.5Kg. Para cada uma das forças aplicadas foi analisado a deformação do modelo impresso.

O modelo impresso pelo extrusor ajustável cedeu ao fim de 10 kg de força aplicada, enquanto, a peça impressa pelo extrusor convencional cedeu ao fim de 6Kg de força aplicada. Verificou-se para este caso um aumento 60% na resistência mecânica no modelo impresso pelo extrusor ajustável. É necessário referir que os modelos impressos pelas duas tecnologias cederam na zona central dos mesmos.

Segunda análise

O segundo modelo foi submetido aos mesmos testes de deflexão executados na primeira análise. No entanto os resultados obtidos foram diferentes. Neste caso o fator que influenciou a resistência mecânica foi a própria geometria da peça.

O modelo impresso pelo extrusor ajustável cedeu ao fim de 8 kg de força aplicada, enquanto, a peça impressa pelo extrusor convencional cedeu ao fim de 4Kg de

força aplicada. Verificou-se para este caso um aumento 100% na resistência mecânica para o modelo impresso pelo extrusor ajustável.

7 – Conclusões

7.1 – Conclusões gerais

Nesta dissertação foi proposto um novo método de extrusão para a impressão 3D e correspondente protótipo para o fabrico de peças a três dimensões. A metodologia consiste em depositar um filamento com perfil retangular invés do tradicional filamento circular. A aplicação da tecnologia idealizada permite diminuir o tempo de impressão, aumentar a resistência das peças e a melhoria da qualidade superficial. Estas características particulares permitem abrir novas perspetivas ao dimensionamento estrutural dos modelos impressos.

O protótipo desenvolvido corresponde de forma genérica à metodologia idealizada, ainda que com algumas limitações, nomeadamente no que diz respeito à incapacidade de realizar extrusões e rotações de elevada velocidade. Salienta-se no entanto que o protótipo permitiu alcançar os objetivos idealizados: fazer extrusão de um filamento retangular de forma controlada, permitir a redução de 50% do tempo de impressão, o aumento da resistência mecânica do modelo impresso, e melhoria na qualidade superficial da peça.

O desenvolvimento do protótipo do sistema de extrusão envolveu o trabalho de conceção e construção do equipamento e o trabalho de avaliação dos elementos produzidos, ao nível da influência do método e do próprio equipamento nas propriedades dos modelos impressos. Da parte dos trabalhos referente à conceção e construção do protótipo, salientam-se as seguintes conclusões principais:

- O protótipo apresenta capacidade de fazer extrusões entre os 5 mm/s e 20 mm/s, sem apresentar defeitos visíveis no filamento extrudido. Em oposição para velocidades superiores conclui-se que a o filamento extrudido apresenta algumas inconsistências.
- A medição dos filamentos extrudidos para velocidades de extrusão entre os 5 mm/s e os 20 mm/s permite confirmar que as dimensões obtidas foram sempre as desejadas.
- Confirmou-se que o protótipo permite realizar operações de tração dentro da gama pretendida, sem danificar o filamento tracionado.

- A colaboração entre o autor da dissertação, o orientador e a empresa *BEEBERYCREATIVE* em paralelo, foi fundamental para que se pudessem cruzar ideias e conhecimento para produzir um equipamento final.

O trabalho experimental no âmbito da presente dissertação permitiu avaliar as capacidades do equipamento, assim como analisar as propriedades dos modelos impressos, comparando-as com elementos produzidos por via tradicional. Com Base nos resultados alcançados, são obtidas as seguintes conclusões principais:

- Confirmou-se que o protótipo permite realizar impressões com uma redução significativa no tempo de impressão. É possível obter uma redução de 50% no tempo total de impressão de um modelo.
- Constatou-se que os modelos impressões obtiveram uma melhoria significativa na resistência mecânica. Verificou-se que para além do aumento da resistência das paredes do modelo impresso, houve um aumento da resistência do preenchimento interno do modelo.
- Para impressões de baixa resolução foi possível ver a olho nu as melhorias na qualidade superficial dos modelos impressões. Foram obtidas impressões com paredes mais lisas e mais consistentes.

Um segundo trabalho proposto nesta dissertação, foi o desenvolvimento de um programa de corte de modelos 3D. Este programa é responsável pelo corte de um modelo em sucessivas camadas de duas dimensões. Cada camada é posteriormente impressa pela impressora 3D. O desenvolvimento do programa vai permitir gerar um código de controlo específico para o extrusor ajustável. Este é desenvolvido a pensar exclusivamente na tecnologia desenvolvida nesta dissertação.

O programa de corte desenvolvido corresponde de forma geral à metodologia idealizada, no entanto apresenta um conjunto de limitações, nomeadamente a incapacidade de efetuar a conversão de alguns modelos devido a limitações dos algoritmos implementados. Por outro lado, salienta-se a capacidade que o programa em realizar conversões de elevada qualidade para a maioria dos modelos.

Esta parte do trabalho da dissertação envolveu a conceção e desenvolvimento do programa de corte e o trabalho de avaliação das conversões geradas, ao nível de percursos obtidos e da consistência dos mesmos. Dos trabalhos relativos a conceção do desenvolvimento do programa de corte salientam-se as seguintes conclusões principais:

- Capacidade de realizar operações de corte de um modelo a três dimensões no formato STL. O programa de corte permite cortes numa gama de resolução de corte entre os 300 μm e os 50 μm .
- Constatou-se que o preenchimento calculado corresponde ao que é pretendido pelo utilizador. É possível obter preenchimentos numa gama entre 1% e os 100%
- Foi verificado a capacidade de realizar operações de Offset dos contornos obtidos pelo corte do modelo.

O trabalho experimental do programa de corte permitiu avaliar as capacidades e funcionalidades do programa. Com base nos resultados obtidos, é possível tirar as seguintes conclusões principais:

- O código gerado permitiu obter modelos impressos de elevada qualidade e sem defeitos. No entanto para alguns modelos, o código gerado apresenta algumas irregularidades, tal como percurso sem deposição de filamento e travessias mal geradas.
- Conclui-se que a velocidade de rotação é devidamente controlada.

7.2 – Trabalhos futuros

No seguimento do trabalho incitado na presente dissertação, tendo noção das incertezas que surgiram ao longo dos trabalhos efetuados, assim como o desempenho dos equipamentos implementados, considera-se que a tecnologia de extrusão e programa de corte desenvolvidos apresentam viabilidade adequada para justificar a continuação de estudos e desenvolvimento dos mesmos. De seguida enumeram-se algumas sugestões para o desenvolvimento de trabalhos futuros ao nível da tecnologia desenvolvida:

- Desenvolvimento de um novo equipamento que permita a extrusão de filamentos de maiores dimensões sem comprometer a qualidade das peças impressas;
- Estudo da dimensão ideal do filamento extrudido, bem como a temperatura e o tempo de arrefecimento ideal, de modo a obter impressões de elevada qualidade e resistência mecânica;
- Desenvolver um sistema de tração que permita a utilização de materiais flexíveis, sem comprometer a qualidade da impressão;
- Desenvolver um sistema de tração de aquecimento do filamento, que permita obter velocidade de extrusão superior a 20 mm/s.

No sentido de melhoramento do programa de corte ao nível das funcionalidades implementadas, enumeram-se algumas sugestões:

- Desenvolvimento de um ambiente gráfico mais intuitivo e com maior número de opções de controlo.
- Desenvolvimento de uma funcionalidade que permite visualizar em 3D o modelo impresso.
- Otimização dos algoritmos de corte, *offset* e de preenchimento interno do modelo implementados pelo programa.
- Desenvolvimento de uma funcionalidade que permite a geração de suporte externo automático para um modelo.
- Implementar vários tipos de padrões de preenchimento interno do modelo.
- Implementar funcionalidades que permitam ao utilizar alterar um conjunto de parâmetros, tal como a escolha do padrão de preenchimento, escolha das técnicas de aderência, alterar parâmetros de extrusão, alterar as características da impressora.

8 - Referências

ROSENFELD, H; VALERI, S. G. *Gerenciamento de projetos*.

HEINZL, J., HERTZ, CH. *Ink-Jet printing. Advances in Electronics and Electron Physics*. Orlando, 1985.

NERI VOLPATO, *Prototipagem Rápida: tecnologias e aplicações*, 2007.

K.G.SWIFT, P.D.BOOKER, *Seleção de processos de manufatura*, 2011

C. K. CHUA , K. F. LEONG, *Rapid prototyping : Principles and Applications* ,2010.

HOD LIPSON, MELBA KURMAN, *Frabricated: The new World of 3D Printing*, 2013.

SALEEM HASHMI, *Comprehensive Materials Processing*, 2014.

CORNELIUS. T. LEONDES, *Computer Aided and Integrated Manufacturing Systems*, 2003.

ADDULAKH K. MIKITAIEV, *Polymers, Polymer Blends, Polymer Composites and Filled Polymers: Synthesis, Properties and Applications* ,2006.

VOLPATO, N. *Os principais processos de prototipagem rápida*, 2007.

PAULO JORGE BÁRTOLO, *Stereolithography: Materials, Processes and Applications*, 2011.

R.J.M. HAGUE, P.E.REEVES, *Rapid Prototyping Tooling and Manufacturing*.

VOLKER SCHIMDT, MARIA REGINA B., *Laser Technology in Biomimetics: Basics and Applications*, 2013

JOAN H., RICH C. , *3D Printing with MatterControl : Streamline the 3D printing process with open source software*, 2015.

JOE MICALLEF, *Beginning Design for 3D Printing*, 2015.

ALICIA GIBB, *Building Open Source HardWare: DIY MANufcaturing for Hackers and Makers*, 2015.

KEVIN ROEBUCK, *3D Printing: High-impact Emerging Technology – What You Need to Know: Definitions, Adoptions, Impact, Benefits, Maturity, Vendors*, 2011.

CHRISTOPHER BARNATT, *3D Printing: The Next Industrial Revolution*, 2013.

GREG NORTON, *3D Printing: The Ultimate Guide to Mastering 3D Printing for Life*, 2015